



Fachhochschule Karlsruhe
- University of Applied Sciences -
Fachbereich Elektro- und Informationstechnik
Studiengang Elektrische Energietechnik

DIPLOMARBEIT

Nr. 1302

Konzeption und Inbetriebnahme eines automatisierten Dauerteststandes zur Untersuchung der Degradation von PEM-Brennstoffzellen

vorgelegt von

Patrick König

Matrikel-Nr.: 008432

Hauptreferent:	Prof. Dr. rer. nat. Klaus Wolfrum
Korreferent:	Prof. Dipl.-Ing. Guntram Schultz
Betreuerin:	Dipl.-Ing. Ursula Wittstadt Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme



Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Diplomarbeit mit dem Thema „Konzeption und Inbetriebnahme eines automatisierten Dauerteststandes zur Untersuchung der Degradation von PEM-Brennstoffzellen“ ohne unzulässige fremde Hilfe selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben.

Freiburg, den 4. März 2002

Patrick König

Danksagung

Mein Dank für die hervorragende Betreuung dieser Arbeit gilt Herrn Prof. Dr. Klaus Wolfrum von der Fachhochschule Karlsruhe.

Für die Betreuung am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme möchte ich mich bei Frau Dipl.-Ing. Ursula Wittstadt besonders bedanken.

Ebenso gilt mein Dank Dipl.-Ing. Tom Smolinka, Dipl.-Ing. Ansgar Rau, Dipl.-Ing. (FH) Thomas Jungmann, Michael Czok und besonders Dipl.-Ing. (FH) Dirk Timm sowie allen Kollegen, durch deren fachliche Unterstützung und so manche Anregung diese Arbeit in freundschaftlicher Atmosphäre geschaffen wurde.

Dank gebührt rückblickend meinen Freunden, speziell Torsten Broß, Klaus Dieter Eckert, Frank Meier und Ulrich Mohr, die stets dafür sorgten, dass während des Studiums auch der Spaß nie zu kurz kam.

Ein besonderer Dank geht an meine Eltern Isolde und Alfred König und meine Brüder Marc und Dominik, ohne deren Liebe, Vertrauen und Unterstützung -moralisch, fachlich und musikalisch- das Studium nicht möglich gewesen wäre.

Für die liebevolle, moralische und seelische Unterstützung möchte ich mich vor allem bei Simone bedanken.

Kurzfassung

Zur Untersuchung der Alterungsmechanismen in Polymermembran-Brennstoffzellen (PEMFC) wurde in der vorliegenden Diplomarbeit im Rahmen eines Verbundforschungsprojektes ein automatisierter Teststand entwickelt und in Betrieb genommen.

Mit Hilfe einer Gasdosierungseinheit ist es neben der Versorgung des Teststandes mit Luft möglich, definierte Gasmischungen von Wasserstoff und Stickstoff einzustellen, um den Einfluss der Brenngaskonzentration auf die Degradationsmechanismen ersichtlich zu machen. Durch nachgeschaltete temperierte Befeuchtereinheiten wird eine Gasbefeuchtung von 0% bis 100% rel. Feuchte in einem Temperaturbereich von bis zu 140°C realisiert, was eine Untersuchung der Einflüsse von Feuchte und Temperatur ermöglicht. In den Teststand ist eine elektronische Last integriert, die eine definierte Belastung der Brennstoffzellen zulässt. Mit einem Eingangsspannungsbereich der Last von 0 V bis 40 V sind dabei genaue Lastsimulationen auch bei geringsten Spannungen möglich (sog. 0-Volt-Funktion).

Mit Hilfe eines Datenerfassungssystems bestehend aus Datenlogger, Messplatzrechner und LabVIEW™-Software wurde eine vollständige Automatisierung realisiert.

Durch eine umfangreiche Inbetriebnahme wurde abschließend die korrekte Funktion aller Komponenten des Teststandes nachgewiesen.

Abstract

In the context of an alliance research project for the investigation of aging mechanisms in proton exchange membrane fuel cells (PEMFC) in this diploma thesis an automated test facility was developed and put into operation.

The test facility includes a gas proportioning unit supplying the fuel cells with hydrogen and air as well as to regulate well-defined mixtures of hydrogen and nitrogen in order to determine the influence of different gas concentrations on the degradation mechanisms. With temperature regulated humidifier units downstream a gas moisturisation of 0% to 100% relative humidity at temperatures up to 140°C is possible, showing the influence of temperature and humidity. The test fuel cells are able to be characterised exactly by an electronic load including an integrated 0-Volts-feature. A LabVIEW™ based data acquisition system consisting of a data logger and an adjacent computer was also implemented. The correct operation of all components of the test facility was finally proven by an extensive initiation.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
1.1	MOTIVATION	1
1.2	ZIELSTELLUNG	2
2	GRUNDLAGEN DER BRENNSTOFFZELLE	4
2.1	EINFÜHRUNG	4
2.2	ALLGEMEINE FUNKTIONSWEISE	5
2.3	TYPEN VON BRENNSTOFFZELLEN	6
2.3.1	AFC – Alkalische Brennstoffzelle	7
2.3.2	PEMFC – Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle	8
2.3.3	DMFC – Direktmethanol-Brennstoffzelle	8
2.3.4	PAFC – Phosphorsaure Brennstoffzelle	8
2.3.5	MCFC – Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle	9
2.3.6	SOFC – Oxidkeramische Brennstoffzelle	9
3	DIE PEM-BRENNSTOFFZELLE	10
3.1	AUFBAU EINER PEMFC	10
3.2	CHEMISCHE GRUNDLAGEN	12
3.2.1	Zellreaktion	12
3.2.2	Gasumsatz und Stöchiometrie	12
3.3	THERMODYNAMISCHE GRUNDLAGEN	14
3.4	KINETISCHE GRUNDLAGEN	15
3.5	LEISTUNG DER BRENNSTOFFZELLE	17
3.6	WIRKUNGSGRAD	17
3.7	EINFLUSSGRÖßEN UND BETRIEBSPARAMETER	19
3.8	DEGRADATION UND LANGZEITVERHALTEN	20
3.9	BESCHLEUNIGTE ALTERUNGSTESTS	22
3.9.1	Vorüberlegungen	22
3.9.2	Konventionen	23
3.9.3	Beschleunigungsmodelle	25
4	KONZEPTION DES TESTSTANDES	30
4.1	ALLGEMEINE ANFORDERUNGEN UND RANDBEDINGUNGEN	30
4.2	BRENNSTOFFZELLEN	31
4.3	GASDOSIERUNG	33
4.4	GASBEFEUCHTUNG	36
4.5	FEUCHTEMESSUNG	43
4.6	TEMPERATURMESSUNG	45
4.7	DRUCKMESSUNG	47
4.8	ELEKTRONISCHE LAST	48
4.9	STROMVERSORGUNG	49
5	AUTOMATISIERUNG DES TESTSTANDES	51
5.1	MESS-, STEUER- UND REGELSTELLEN	51
5.2	HARDWARE ZUR DATENERFASSUNG	54
5.2.1	Datenlogger	54
5.2.2	Messplatzrechner	55

5.3	AUTOMATISIERUNG MIT LABVIEW™	56
5.3.1	Beschreibung der Software	56
5.3.2	Hauptprogramm des Teststandes	56
5.3.3	Programm der elektronischen Last	67
6	INBETRIEBNAHME DES TESTSTANDES	68
6.1	TEST DER GASDOSIERUNG	68
6.2	TEST DER GASBEFEUCHTUNG	69
6.2.1	Erreichen des maximalen Feuchtwertes.....	69
6.2.2	Schrittweise Befeuchtung	71
6.2.3	Befeuchtung bei Temperierung	72
6.3	TESTBETRIEB MIT EINER BRENNSTOFFZELLE	74
6.3.1	Allgemeine Durchführung der Messungen	75
6.3.2	Messungen und Ergebnisse.....	75
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	79
8	QUELLEN UND LITERATURVERZEICHNIS	81
9	ANHANG – CD-ROM	83

Abkürzungen

A/D	Analog/Digital
AFC	Alkalische Brennstoffzelle (eng.: alkaline fuel cell)
ALT	Beschleunigte Alterungstests (eng.: Accelerated Life Tests)
abs	absolut
BHKW	Blockheizkraftwerk
BZ / BSZ	Brennstoffzelle(n)
DDE	Dynamic Data Exchange
DI	deionisiert
DIN	Deutsche Industrie Norm
DMFC	Direktmethanol-Brennstoffzelle (eng.: direct methanol fuel cell)
FhG	Fraunhofer Gesellschaft
GDL	Gasdiffusionslage
G-Mode	Konstantleitwert-Modus (der elektronischen Last)
GPB	General Purpose Interface Bus
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
I-Mode	Konstantstrom-Modus (der elektronischen Last)
I/O	Input/Output
ISE	Institut für Solare Energiesysteme
MCFC	Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (eng.: molten carbonate fuel cell)
MEA	Membran-Elektroden-Einheit (eng.: Membrane Electrode Assembly)
MOS-FET	Metal-Oxide-Semiconductor-Feldeffekttransistor
MSR	Messen, Steuern, Regeln
PAFC	Phosphorsaure Brennstoffzelle (eng.: phosphoric acid fuel cell)
PC	Personal Computer
PCI	Peripheral Component Interconnect
PEFC	Proton Exchange Fuel Cell
PEM	Proton Exchange Membrane / Polymer Elektrolyt Membran
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
PTFE	Poly-Tetra-Fluor-Ethylen
ppm	parts per million
RAM	Random Access Memory
rel	relativ
rF	relative Feuchte

SOFC	Oxidkeramische Brennstoffzelle (eng.: solid oxide fuel cell)
subVI	untergeordnetes Virtuelles Instrument (LabVIEW TM -Unterprogramm)
U-Mode	Konstantspannungs-Modus (der elektronischen Last)
VI	Virtuelles Instrument (LabVIEW TM -Programm)
Vol. %	Volumenprozent
ZSW	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung
% v. E.	Prozent vom Endwert

Formelzeichen, Indizes

A	aktive Elektrodenfläche	$[A] = \text{cm}^2$
AF	Beschleunigungsfaktor (eng.: Acceleration Factor)	
Al	Aluminium	
Au	Gold	
a	absolute Feuchte	$[a] = \text{kg/m}^3$
B	Degradationsparameter	
C	Degradationsparameter	
Ca	Calcium	
CO	Kohlenmonoxid	
CO ₂	Kohlendioxid	
c _p	spezifische Wärmekapazität	$[c_p] = \text{J}/(\text{K} \cdot \text{kg})$
D	Degradationsparameter	
E	Degradationsparameter	
ΔE_a	Aktivierungsenergie	$[\Delta E_a] = \text{eV}$
e ⁻	Elektron	
F	Faraday-Konstante	$[F] = 96485,3 \text{ As/mol}$
G(S)	Modellgleichung für ein Belastungsniveau	
ΔG	freie Reaktionsenthalpie	
ΔG_o^0	reversible Reaktionsarbeit für flüssiges Wasser	$[\Delta G_o^0] = -273,3 \text{ kJ/mol}$
ΔG_u^0	rev. Reaktionsarbeit für gasförmiges Produktwasser	$[\Delta G_u^0] = -228,6 \text{ kJ/mol}$
H ⁺	Wasserstoffion, Proton	
H ₂	Wasserstoff	
H ₂ O	Wasser	

ΔH	Reaktionsenthalpie	$[\Delta H] = \text{J/mol}$
ΔH_o^0	oberer Heizwert	$[\Delta H_o^0] = \text{kJ/mol}$
I	Stromstärke	$[I] = \text{A}$
I_m	theoretischer elektrischer Strom	$[I_m] = \text{A}$
j	Stromdichte	$[j] = \text{A/cm}^2$
K	konstanter Faktor	
k	Boltzmann-Konstante	$[k] = 8,617 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$
l_n	Normliter (bei T_0 und p_0)	
M	Molmasse	$[M] = \text{kg/mol}$
m	Masse	$[m] = \text{kg}$
$\dot{m}$	Massenstrom	$[\dot{m}] = \text{kg/s}$
N_2	Stickstoff	
N_A	Avogadro-Konstante	$[N_A] = 6,0221367 \cdot 10^{23} \text{ 1/mol}$
N_i	Stoffmengenstrom	$[N_i] = \text{mol/s}$
n	umgesetzte Stoffmenge	$[n] = \text{mol}$
O_2	Sauerstoff	
P_{el}	elektrische Leistung	$[P_{el}] = \text{W}$
Pt	Platin	
p	Partialdruck	$[p] = \text{bar}$
p_0	Standarddruck	$[p_0] = 1,013 \text{ bar}$
p_A	Leistungsdichte	$[p_A] = \text{W/cm}^2$
p_D	Partialdampfdruck	$[p_D] = \text{Pa}$
p_s	Sättigungsdampfdruck	$[p_s] = \text{Pa}$
Q	Ladung	$[Q] = \text{C}$
R	universelle Gaskonstante	$[R] = 8,314 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$
RH	relative Feuchte (eng.: Relative Humidity)	
Ru	Ruthenium	
S	Belastungsniveau, Stress Level	
ΔS	Reaktionsentropie	$[\Delta S] = \text{J/(mol}\cdot\text{K)}$
T	Temperatur	$[T] = \text{K}$
T_0	Standardtemperatur	$[T_0] = 273,15 \text{ K}$
T_o	obere Systemtemperatur	$[T_o] = \text{K}$
T_u	Umgebungstemperatur	$[T_u] = \text{K}$
ΔT	Temperaturunterschied	$[\Delta T] = \text{K}$

t_f	Ausfallzeit	
t_s	time to fail at stress	
t_u	time to fail at use	
U	Zellspannung	$[U] = V$
U_{rev}^0	reversible Zellspannung	$[U_{rev}^0] = V$
U_R	Ruhepotential	$[U_R] = V$
U_{th}	enthalpische Zellspannung	$[U_{th}] = V$
ΔU	Spannungsverlust	$[\Delta U] = V$
ΔU_D	Durchtrittsüberspannung	$[\Delta U_D] = V$
ΔU_{Diff}	Diffusionsüberspannung	$[\Delta U_{Diff}] = V$
ΔU_R	Widerstandsüberspannung	$[\Delta U_R] = V$
ΔU_{rev}	reversible Spannungsdifferenz	$[\Delta U_{rev}] = V$
V	Volumen	$[V] = m^3$
V	Spannung (eng. Konvention)	$[V] = V$
V_{mol}	Molvolumen	$[V_{mol}] = 22,414 \text{ l/mol}$
V_{Signal}	Spannungspegel des Ausgangssignals	
$\dot{V}$	Volumenstrom	$[\dot{V}] = l_n/\text{min}$
$\bar{x}$	gleichgewichtetes Mittel	
z	Ladungszahl	
Φ_m	Massendurchfluss	$[\Phi_m] = \text{kg/s}$
Φ_v	Volumendurchfluss	$[\Phi_v] = m^3/\text{s}$
α	Degradationsparameter	
β	Degradationsparameter	
γ	Degradationsparameter	
η_C	Carnot-Wirkungsgrad	
η_{ges}	Gesamtwirkungsgrad	
$\eta_{l,i}$	Faraday-Wirkungsgrad	
η_{max}	idealer Wirkungsgrad	
η_U	Spannungswirkungsgrad	
λ	Stöchiometriefaktor	
ρ	Dichte	$[\rho] = \text{kg/m}^3$
φ	relative Luftfeuchte	$[\varphi] = 1$
φ	Gasvolumenstrom	$[\varphi] = l/(A \cdot \text{min})$

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1-1: Energieumwandlungskette nach [8]	2
Abbildung 2-1: Schema einer Brennstoffzellen-Batterie, Sir W. Grove 1842	4
Abbildung 2-2: Typische Anwendungen von Brennstoffzellen [Siemens]	5
Abbildung 2-3: Knallgasreaktion und Reaktionsprinzip der Brennstoffzelle nach [8]	5
Abbildung 2-4: Prinzipdarstellung unterschiedlicher Brennstoffzellen-Typen [9]	6
Abbildung 3-1: Schematischer Aufbau einer PEM-Einzelzelle [8]	10
Abbildung 3-2: Chemische Formeln verwendeter Polymere [3]	11
Abbildung 3-3: Chemische Zellreaktion der PEMFC nach [9]	12
Abbildung 3-4: Schematische Darstellung einer U/I-Kennlinie	16
Abbildung 3-5: Vergleich Carnot-/Brennstoffzellen-Wirkungsgrad nach [9]	18
Abbildung 3-6: Korrodierte Bipolarplatte (anodenseitig) [4]	21
Abbildung 3-7: Maximaler Belastungsbereich für Testobjekte [11]	24
Abbildung 3-8: Konstante Belastung über die Zeit [11]	24
Abbildung 3-9: Verschiedene zeitabhängige Belastungsverläufe [11]	25
Abbildung 4-1: Schema des Brennstoffzellen-Teststandes	31
Abbildung 4-2: Schematische Darstellung der Testzelle [ZSW]	32
Abbildung 4-3: Dichtungskonzept mit Viton® [13] und Endplatte mit Flowfield [ZSW] ..	33
Abbildung 4-4: Digitaler Massendurchflussregler EL-FLOW [17]	34
Abbildung 4-5: Messprinzip der thermischen Massendurchflussmessung [17]	34
Abbildung 4-6: Schematische Darstellung der Gasdosierung	35
Abbildung 4-7: Strömungsbereiche in Blasensäulen [15]	37
Abbildung 4-8: Schnittdarstellung eines Befeuchters	40
Abbildung 4-9: Bodenflansch mit angeschweißter Sinterscheibe	41
Abbildung 4-10: Blindflansch mit Rohrwendel	42
Abbildung 4-11: Befeuchter mit Heizband, Thermoelementen und Heizschläuchen	43
Abbildung 4-12: Feuchtefühler ROTRONIC HYGROMER® I-1000	44
Abbildung 4-13: Feuchtemesskammer	45
Abbildung 4-14: Mantel-Thermoelement mit Ausgleichsleitung	46
Abbildung 4-15: KELLER Drucksensor Serie 33	47
Abbildung 4-16: Klemmenkasten Frontansicht und Verdrahtung	50
Abbildung 5-1: Verfahrensfließbild des Teststandes	52
Abbildung 5-2: Hauptbildschirm "System Config-F4"	57

Abbildung 5-3: Hauptbildschirm "Flussdiagramm-F1"	59
Abbildung 5-4: Hauptbildschirm "Datendisplay-F2"	60
Abbildung 5-5: Hauptbildschirm "Brennstoffzelle-F3"	60
Abbildung 5-6: VIs zur Initialisierung des Datenloggers	61
Abbildung 5-7: Blockdiagramm zur Datenerfassung und -aufbereitung	62
Abbildung 5-8: Blockdiagramm zur Erzeugung der Messwertdatei	63
Abbildung 5-9: Blockdiagramm zur Erzeugung des Datei-Headers	63
Abbildung 5-10: Blockdiagramm zur Speicherung der Messwerte	64
Abbildung 5-11: Blockdiagramm der Zweipunkt-Regelung	65
Abbildung 5-12: Blockdiagramm zur Temperaturregelung und Magnetventilsteuerung ...	65
Abbildung 5-13: Blockdiagramm der Durchflussregler-Steuerung	66
Abbildung 5-14: Frontpanel der elektronischen Last 7141-Z	67
Abbildung 6-1: Anodenseitige Befeuchtung bei unterschiedlichen Volumenströmen	70
Abbildung 6-2: Kathodenseitige Befeuchtung bei unterschiedlichen Volumenströmen	70
Abbildung 6-3: Schrittweise Befeuchtung anoden- und kathodenseitig	71
Abbildung 6-4: Temperaturverläufe des Aufheizversuches	72
Abbildung 6-5: Thermografie-Nahaufnahme des Teststandes	73
Abbildung 6-6: Kennlinien bei unterschiedlicher Befeuchtung	76
Abbildung 6-7: Kennlinien bei Temperierung der Zelle	77
Abbildung 6-8: Verlauf der Leistungsdichten bei Luft- und Sauerstoffbetrieb	78
Abbildung 7-1: Gesamtansicht des Teststandes Langlebige PEFC	80
Tabelle 2-1: Spezifische Eigenschaften unterschiedlicher Brennstoffzellen-Typen [3,5]	7
Tabelle 5-1: Verwendete Kennbuchstaben zur Benennung der MSR-Stellen	51
Tabelle 5-2: Übersicht der MSR-Stellen im Verfahrensfließbild	53
Tabelle 6-1: Ergebnisse der Gasdosierungskontrolle	69

1 Einleitung

Die These, dass die zunehmende Freisetzung von Treibhausgasen zu einer Erwärmung der Erdatmosphäre führen könnte, hat sich nach heutigem Kenntnisstand erhärtet. Darum muss es das langfristige Ziel in allen Bereichen der Energieversorgung sein, den globalen Energiebedarf aus emissionsfreien oder regenerativen Energiequellen zu decken.

Als vielversprechender und zukunftsweisender Energieträger wird dabei, neben Erdgas und Methanol, Wasserstoff diskutiert. Im Hinblick auf seine guten energetischen Eigenschaften, wie verlustarme Speichermöglichkeit, gute und sichere Transportmöglichkeit, regenerative Herstellung und damit Schonung der Umwelt, lässt sich dabei das Ziel einer gesamten Wasserstoffwirtschaft verfolgen. Um dieses Ziel zu erreichen ist jedoch ein technologischer Wandel notwendig, zu dem die Brennstoffzellentechnologie schon in der Übergangsphase einen erkennbaren Beitrag leisten kann [4].

1.1 Motivation

Die Wasserstoffenergiewirtschaft wird in Zukunft zur Lösung der Energie- und Umweltprobleme unumgänglich sein. Neben der H₂-Erzeugung, seiner Speicherung und dem Transport kommt seiner Verstromung eine hohe Bedeutung zu. Eine der aussichtsreichsten Möglichkeiten zur Gewinnung elektrischer Energie aus Wasserstoff bietet die Brennstoffzelle.

Herkömmliche Wärmekraftmaschinen wie Verbrennungsmotoren, Dampfmaschinen oder Turbinen gewinnen Arbeit oder elektrische Energie erst aus der zugeführten Wärmeenergie. Dabei wird der theoretische energetische Wirkungsgrad durch einen Gesamtprozess bestimmt, der durch den Carnot-Faktor η_C gekennzeichnet ist:

$$\eta_C = \frac{\text{abgegebene Arbeit}}{\text{eingebrachte Wärmeenergie}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (\text{Gl. 1.1})$$

Die Eintrittstemperatur T_1 des Arbeitsmediums der entsprechenden Wärmekraftmaschine ist dabei höher als dessen Austrittstemperatur T_2 . Der Wirkungsgrad bei der Umwandlung von thermischer in mechanische Energie ist somit theoretisch auf etwa 50% begrenzt [8].

In einer Brennstoffzelle jedoch wird die chemische Energie des Wasserstoffs direkt in elektrische Energie umgewandelt, ohne dabei im Wirkungsgrad durch den Carnot-Faktor begrenzt zu sein (vgl. Abb. 1-1).

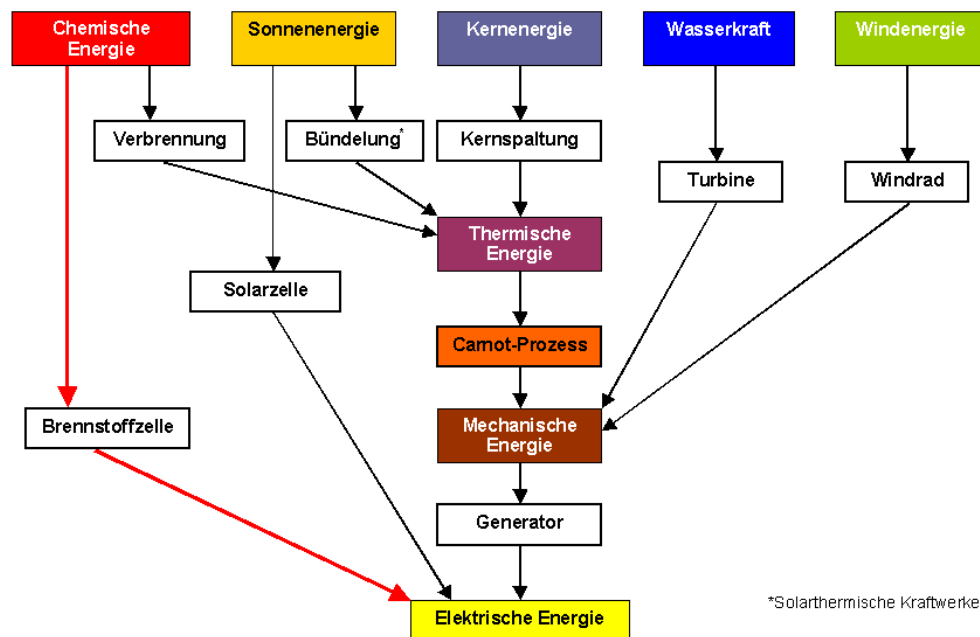


Abbildung 1-1: Energieumwandlungskette nach [8]

Die Entwicklung von Brennstoffzellensystemen, besonders der PEM-Brennstoffzellen (genauer beschrieben in den nachfolgenden Kapiteln) hat in den letzten Jahren enorme Fortschritte gemacht. Eine Markteinführung steht jedoch noch aus, was neben den hohen Kosten auf die nicht ausreichende Lebensdauer der Brennstoffzellen zurückzuführen ist.

Die Verminderung der Degradation, d.h. der Alterung von Brennstoffzellen, ist somit ein wesentliches Kriterium für den praktischen Einsatz, besonders für Anwendungen in der Kraft-Wärme-Kopplung im Siedlungs- und Hausenergiebereich. Die Identifikation lebensdauerfördernder Betriebsbedingungen bietet die Chance, durch geeignete Konstruktion und Betriebsführung von Brennstoffzellen-Systemen das Einsatzpotential dieser Technologie beträchtlich zu erweitern. Die Verfügbarkeit verlässlicher beschleunigter Lebensdauertests erleichtert vor allem die Entwicklung und daher eine frühzeitige Markteinführung dieser Technologie in allen Anwendungsfeldern [7].

1.2 Zielstellung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll nun ein Dauerteststand konzipiert, automatisiert und in Betrieb genommen werden, der in der Lage ist, PEM-Brennstoffzellen unter verschiedenen Randbedingungen zu betreiben und zu vermessen.

Detaillierte Untersuchungen der Degradationsprozesse in Brennstoffzellen wurden erst für einige wenige Fragestellungen begonnen. Andere mögliche Problemkreise wurden zum

Teil noch gar nicht erkannt. Die Konzeption des Teststandes stützt sich darum auf die Untersuchung möglichst vieler Einflussfaktoren.

Die Aufgabenstellung dieser Diplomarbeit ist Teil eines Verbundforschungsprojektes zur genaueren Untersuchung der Alterung von PEM-Brennstoffzellen unter der Leitung des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW).

Ziele des Vorhabens sind:

- Bestimmung und Aufklärung der verschiedenen Degradationsprozesse
- auf Basis des Know-hows der Alterungsmechanismen die Alterung präventiv zurückzudrängen und beschleunigte Alterungstests zu entwickeln.

Das Fraunhofer ISE hat dabei unter anderem die Aufgabe, Langzeittests an Einzelzellen unter standardisierten Bedingungen durchzuführen. Diese Experimente sollen zur Verifikation von theoretisch entwickelten Alterungsmodellen sowie als Kalibrierungsmessungen dienen.

2 Grundlagen der Brennstoffzelle

2.1 Einführung

Der englische Jurist und Physiker Sir William Grove (1811 bis 1896) entdeckte das Prinzip der Brennstoffzelle vermutlich zufällig bei seinen Experimenten zur Elektrolyse von Wasser im Jahre 1839. Bei der Elektrolyse wird Wasser durch elektrischen Strom in seine beiden Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt, bei einer Brennstoffzelle wiederum wird durch die Verbindung von Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser elektrische Energie erzeugt (vgl. Abb. 2-1).

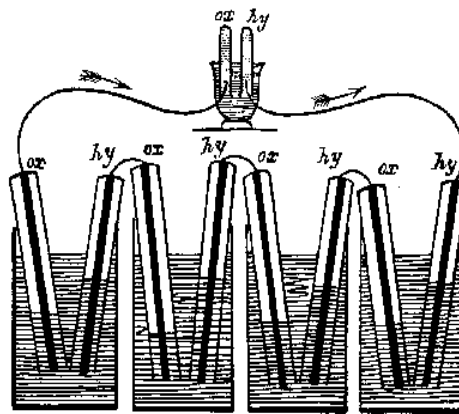


Abbildung 2-1: Schema einer Brennstoffzellen-Batterie, Sir W. Grove 1842

Das durch die Entdeckung des elektrodynamischen Prinzips und der Erfindung der ersten Batterien von Werner von Siemens (1816 bis 1892) gegen Ende des 19. Jahrhunderts in Vergessenheit geratene Prinzip der Brennstoffzelle wurde erst Mitte dieses Jahrhunderts für lautlose Antriebe und zuverlässige Stromversorgungen in Raumfahrzeugen und U-Booten wiederentdeckt.

Heutige Brennstoffzellensysteme sind hauptsächlich für die Automobilbranche und im Bereich stationärer Anwendungen interessant. Von den Automobilkonzernen werden zurzeit Aufwendungen für Forschung und Entwicklung im Umfang von mehreren Milliarden US-Dollar getätigt [3]. Darüber hinaus gibt es neben der reinen zentralen oder dezentralen Stromerzeugung auf Erdgasbasis im wesentlichen zwei Entwicklungsrichtungen, das Blockheizkraftwerk mit 200 kW_{el} bis 300 kW_{el} zur Kraft-Wärme-Kopplung und Kleinsysteme mit einer elektrischen Leistung von 1 kW bis 5 kW zur Einzelversorgung von Wohnhäusern.

Ein weiteres aktuelles Anwendungsgebiet stellen Klein-Brennstoffzellen für den Einsatz als Energieversorgung für Kleingeräte dar, die mit einem Leistungsbereich von 1 W bis 500 W Computer und mobile Telekommunikationsgeräte versorgen können.

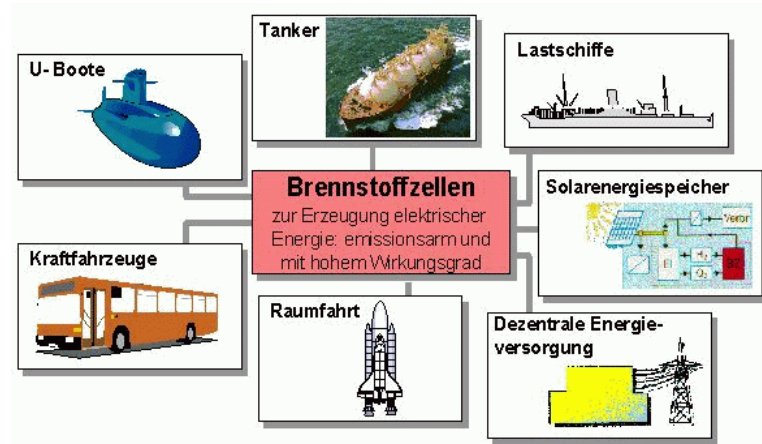


Abbildung 2-2: Typische Anwendungen von Brennstoffzellen [Siemens]

2.2 Allgemeine Funktionsweise

Jede Brennstoffzelle besteht aus zwei Elektroden, der Anode und der Kathode, die durch einen nur für Ionen durchlässigen Elektrolyten voneinander getrennt sind. Somit kann im Gegensatz zur bekannten Knallgasreaktion ($\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$), bei der Wasserstoff und Sauerstoff unter heftiger Explosion zu Wasser reagieren, der Reaktionsablauf so kontrolliert werden, dass der bei jeder chemischen Reaktion stattfindende Elektronenaustausch nicht lokal, sondern über einen äußeren Stromkreis abläuft (vgl. Abb. 2-3).

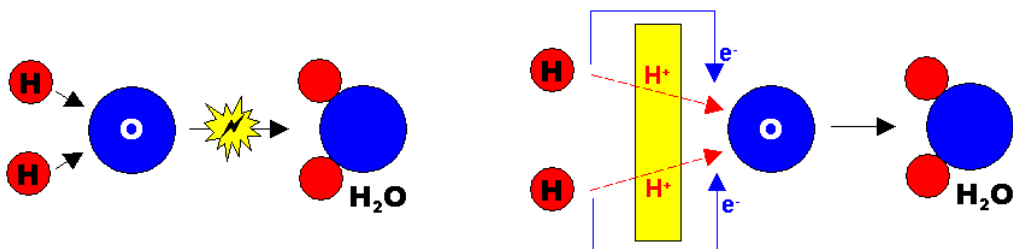


Abbildung 2-3: Knallgasreaktion und Reaktionsprinzip der Brennstoffzelle nach [8]

Die genauen chemischen, thermodynamischen und kinetischen Vorgänge innerhalb einer Brennstoffzelle werden in Kapitel 3 anhand der PEM-Brennstoffzelle ausführlich erläutert.

2.3 Typen von Brennstoffzellen

Die verschiedenen Brennstoffzellentypen werden in der Regel nach Art des verwendeten Elektrolyten klassifiziert. In Abbildung 2-4 ist schematisch das Funktionsprinzip der unterschiedlichen Systeme mit zugehöriger Arbeitstemperatur und der jeweiligen ionischen Spezies, die den Ladungstransport durch den Elektrolyten übernimmt, dargestellt.

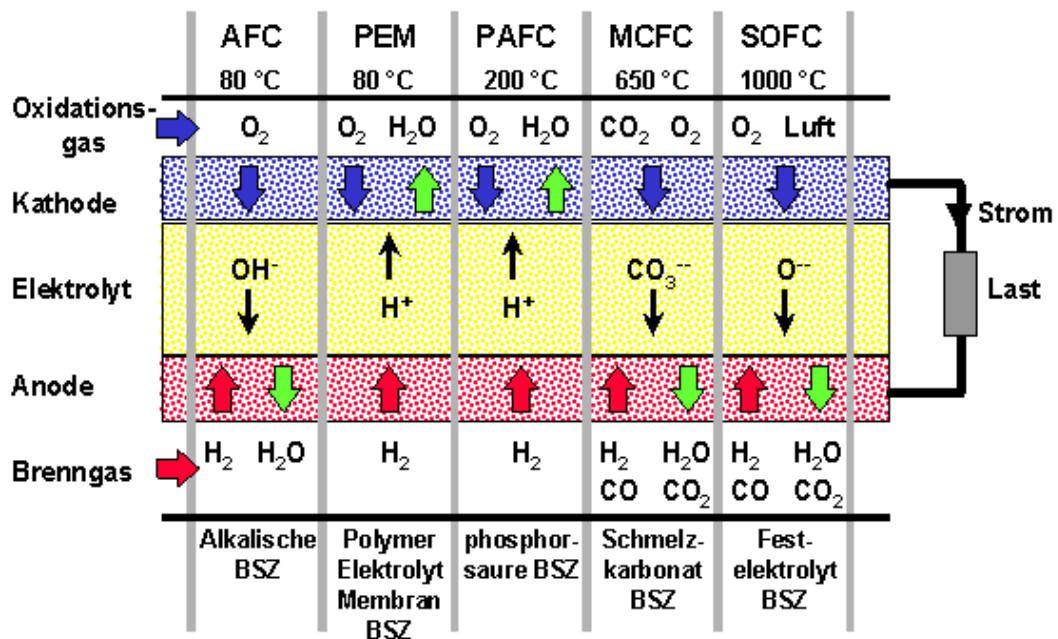


Abbildung 2-4: Prinzipdarstellung unterschiedlicher Brennstoffzellen-Typen [9]

Je nach Art des verwendeten Elektrolyten ergibt sich eine individuelle Betriebstemperatur für die unterschiedlichen Brennstoffzellentypen. Im Bereich von 60°C bis ca. 130°C, dem sog. Niedertemperaturbereich, sind die alkalische Brennstoffzelle (AFC) und die Membran-Brennstoffzellen (PEFC und die in der Abbildung nicht aufgeführte Direktmethanol-Brennstoffzelle) angesiedelt. Zum mittleren Temperaturbereich zwischen 160°C und 220°C wird die phosphorsaure Brennstoffzelle gezählt, während die Schmelzkarbonat- und die Festelektrolyt-Brennstoffzellen im Hochtemperaturbereich betrieben werden. In Tabelle 2-1 sind zusammenfassend die wichtigsten Daten der genannten Brennstoffzellentypen dargestellt.

Internationale Abkürzung und Name	Temp. in Grad Celsius	Elektrolyt	Brennstoff	elektrischer Wirkungsgrad in Prozent	Anwendung
AFC Alkalische Brennstoffzelle (alkaline fuel cell)	80 bis 90	Kalilauge 30% KOH	Reinst Wasserstoff	50 bis 70	Transport Raumfahrt Militär
PEMFC Membran-Brennstoffzelle (proton exchange membrane fuel cell)	80 bis 90	Polymer-membran (z.B. Nafion, Dow)	Wasserstoff, reformiertes Methanol oder Methan	50 bis 68	Elektroantriebe BHKW Batterieersatz Raumfahrt Militär
DMFC Direktmethanol-Brennstoffzelle (direct methanol fuel cell)	80 bis 130	Polymer-membran (z.B. Nafion, Dow)	Methanol (MeOH)	20 bis 30	Elektroantriebe
PAFC Phosphorsaure Brennstoffzelle (phosphoric acid fuel cell)	200	Konzentrierte Phosphorsäure (H ₃ PO ₄)	Wasserstoff, reformiertes Methan	35 bis 55	BHKW Strom-erzeugung
MCFC Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (molten carbonate fuel cell)	650	Alkalikarbonat-Schmelzen (Li ₂ CO ₃ , K ₂ CO ₃)	Erdgas, Kohlegas, Biogas, Wasserstoff	45 bis 60	BHKW reine Strom-erzeugung (Kopplung mit Dampfturbine)
SOFC Oxidkeramische Brennstoffzelle (solid oxide fuel cell)	800 bis 1000	Yttrium-stabilisiertes Zirkonoxid (ZrO ₂ /YO ₃)	Erdgas, Kohlegas, Biogas, Wasserstoff	50 bis 65	BHKW reine Strom-erzeugung (Kopplung mit Gasturbine)

Tabelle 2-1: Spezifische Eigenschaften unterschiedlicher Brennstoffzellen-Typen [3,5]

2.3.1 AFC – Alkalische Brennstoffzelle

Die Alkalische Brennstoffzelle ist der technisch ausgereifteste Brennstoffzellentyp und zeichnet sich durch hohe Wirkungsgrade aus, da die Kinetik der Sauerstoffreduktion in alkalischen Elektrolyten schneller als in sauren Medien abläuft. Verwendet wird konzentrierte Kalilauge (3-50 Gew.-%). Ein entscheidender Nachteil dieses Elektrolyten ist seine Unverträglichkeit gegenüber Kohlendioxid (CO₂), welches bei Kalilauge zur Zersetzung (durch Reaktion zu unlöslichem Karbonat) führt. Diese CO₂-Unverträglichkeit beschränkt den Einsatz von AFC auf Anwendungen, bei denen hochreine Gase zur Verfügung stehen.

2.3.2 PEMFC – Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle

Bei der Membran-Brennstoffzelle wird als Elektrolyt eine dünne, gasdichte, protonenleitende Kunststoffmembran eingesetzt, die zugleich die Funktion des Elektroden- und Katalysatorträgers übernimmt. Fortschritte in der Membrantechnik führten in den 90er Jahren zu einem Entwicklungsschub dieses Brennstoffzellentyps [3]. Der Wirkungsgrad der PEMFC ist mit dem der AFC vergleichbar, jedoch weist die PEMFC höhere Stromdichten auf. Die Arbeitstemperatur liegt bei 60°C bis 80°C, wobei Membran-Brennstoffzellen ein überaus gutes Kaltstartverhalten besitzen. Das Brennstoffspektrum ist auf Wasserstoff und Sauerstoff beschränkt. Allerdings ist im Unterschied zur AFC auch Luftbetrieb möglich, was die Einsatzmöglichkeiten der PEMFC deutlich erweitert. So eignet sich dieser Brennstoffzellentyp insbesondere für dynamische Einsatzfälle und wird darum besonders als Stromerzeuger in der stationären Kraft-Wärme-Kopplung, in Elektromobilen und sonstigen portablen Anwendungen eingesetzt.

Auf diesen, in dieser Diplomarbeit verwendeten und untersuchten Brennstoffzellentyp, soll in Kapitel 3 noch genauer eingegangen werden.

2.3.3 DMFC – Direktmethanol-Brennstoffzelle

Die Direktmethanol-Brennstoffzelle stellt eine Weiterentwicklung der PEMFC dar. Die Besonderheit besteht im verwendeten, relativ leicht verfügbaren Brennstoff Methanol. Sie kann sowohl direkt mit flüssigem Methanol (80-90°C) oder mit Methanoldampf (120-130°C) betrieben werden und stellt darum vor allem für den Fahrzeugantrieb eine sehr interessante Alternative, etwa zum Batteriebetrieb oder zur Wasserstofffahrweise einer PEMFC, dar [5]. Die DMFC befindet sich jedoch noch im Stadium der Grundlagenforschung und Laborentwicklung bei der Material- und Komponentenentwicklung. Ihr Wirkungsgrad und ihre Leistungsdichte liegen derzeit noch unter denen anderer Brennstoffzellen.

2.3.4 PAFC – Phosphorsaure Brennstoffzelle

Dieser Brennstoffzellentyp verwendet als Elektrolyt konzentrierte, nahezu wasserfreie Phosphorsäure in Gelform. Die Verwendung von Säure erlaubt den Einsatz von CO₂-haltigen Reaktionsgasen, da CO₂ nicht mit der Säure reagiert. Auch ist aufgrund der Betriebstemperatur von 200°C die Toleranz gegenüber CO höher. Die PAFC wird darum meist mit Wasserstoff aus reformiertem Erdgas als Brennstoff und Luftsauerstoff als

Oxidationsmittel betrieben. Ihr Wirkungsgrad ist im Vergleich zu anderen Brennstoffzellen eher niedrig, zu dessen Verbesserung aber neben dem atmosphärischen auch ein druckaufgeladener Betrieb möglich ist.

Atmosphärische PAFC sind aus technischer wie aus kommerzieller Sicht für stationäre Anwendungen zur Strom- und Wärmeerzeugung der am weitesten entwickelte Brennstoffzellen-Typ.

2.3.5 MCFC – Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle

Die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle wird bei ca. 650°C mit einem Elektrolyten in Form geschmolzener Alkalikarbonate betrieben, die in einer hochporösen, keramischen Matrix fixiert werden. Die MCFC integriert Kohlendioxid in die Zellreaktion und ist daher sehr gut geeignet zur Verstromung von kohlenwasserstoffhaltigen Gasen, welche unter Ausnutzung der Abwärme der Brennstoffzelle zu Wasserstoff und CO₂ reformiert werden (sog. interne Reformierung) [3]. Der relativ hohe Wirkungsgrad der MCFC im Vergleich zur PAFC ergibt sich aus dem höheren Temperaturniveau.

2.3.6 SOFC – Oxidkeramische Brennstoffzelle

In oxidkeramischen Brennstoffzellen wird ein gasdichter, keramischer Festelektrolyt aus Yttrium-stabilisiertem Zirkonoxid verwendet. Diese Mischoxid-Keramik zeigt bei Temperaturen oberhalb von 750°C eine gute O²⁻-Ionenleitfähigkeit bei gleichzeitiger Gasundurchlässigkeit und vernachlässigbarer Elektronenleitung. Aufgrund der sehr hohen Betriebstemperatur können auch CO-haltige Gasgemische aus der internen Reformierung unmittelbar umgesetzt werden und erlaubt somit den Einsatz unterschiedlichster Brenngase wie z.B. Erdgas, Kohlegas und Biogas. SOFC-Anlagen haben ein hohes Wirkungsgradpotential, besonders in Kombination mit Gas- und Dampfturbinen, jedoch ist dieser Brennstoffzellen-Typ von allen vorangegangenen der am wenigsten weit entwickelte.

3 Die PEM-Brennstoffzelle

In den folgenden Kapiteln soll kurz auf einige, für die Teststandkonzeption wichtige, theoretische Grundlagen der PEM-Brennstoffzellen eingegangen werden. Nach der Beschreibung des allgemeinen Aufbaus und der Erklärung chemischer, thermodynamischer und kinetischer Grundlagen, werden für das Forschungsprojekt relevante theoretische Grundlagen zu Degradationsmechanismen und beschleunigten Alterungstests aufgezeigt.

3.1 Aufbau einer PEMFC

Abbildung 3-1 zeigt den schematischen Aufbau einer PEM-Einzelzelle.

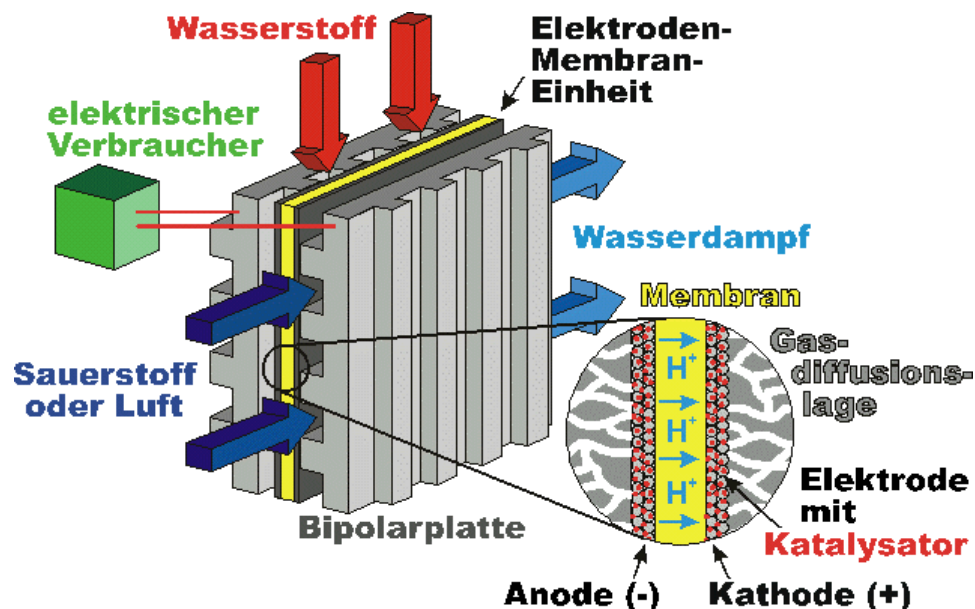


Abbildung 3-1: Schematischer Aufbau einer PEM-Einzelzelle [8]

Wie der Name schon sagt, besteht der Elektrolyt einer PEM-Brennstoffzelle aus einer protonenleitenden **Membran**, einer 30 bis 170 μm dünnen Folie auf der Basis eines perfluorierten, sulfonierten Polymers wie z.B. das von der Firma DuPont entwickelte Nafion[®] oder das Polymer der Firma DOW Chemicals (vgl. Abb. 3-2).

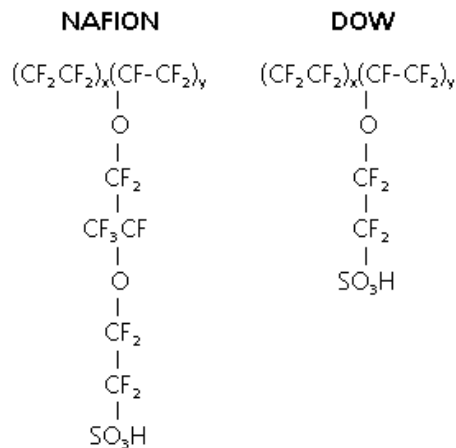


Abbildung 3-2: Chemische Formeln verwendeter Polymere [3]

Neben der Funktion des Elektrolyten übernimmt die Membran bei der PEMFC gleichzeitig die Funktion des Katalysatorträgers für die anodischen und kathodischen Elektrokatalysatoren und des Separators für die gasförmigen Reaktanden. So sind auf beiden Seiten der Polymermembran poröse **Elektroden**, meist ein Geflecht aus Kohlepartikeln, mit einer aktiven **Katalysatorschicht** aufgebracht (vgl. Abb. 3-1). Als Katalysator dienen fein verteilte Edelmetalle, üblicherweise Pt kathodenseitig und Pt/Ru anodenseitig, wobei die Edelmetallbelegung von ursprünglich $0,5 \text{ mg/cm}^2$ auf Werte von bis zu $0,1 \text{ mg/cm}^2$ reduziert werden konnte [4]. Die gesamte Membran-Elektroden-Einheit wird auch als **MEA** (Membrane Electrode Assembly) bezeichnet.

Auf beiden Seiten der MEA wird zusätzlich eine dünne **Gasdiffusionslage** (GDL, „backing layer“), meist aus Kohlefasern oder speziell entwickeltem Graphitgewebe, angepresst. Diese soll für eine möglichst optimale Verteilung und Heranführung der beiden Reaktionsgase auf die gesamte aktive Elektrodenfläche sorgen. Dazu muss die GDL gasdurchlässig sein und den elektrischen Strom von den Elektroden ableiten können.

Die Protonenleitfähigkeit der Membran und damit die Leistung der PEMFC hängt in hohem Maße von ihrem Befeuchtungsgrad ab. Im Normalbetrieb besitzt die Membran einen Wassergehalt zwischen 20% und 40% und weist eine spezifische Leitfähigkeit von ca. $0,1 \text{ S/cm}$ auf [3].

An den **Bipolarplatten**, meist aus Graphit, Stahllegierungen oder elektrisch leitfähigen Composit-Werkstoffen, wird die Spannung abgegriffen. In die Bipolarplatten sind Kanalstrukturen eingearbeitet, zusammenfassend als „**flow field**“ bezeichnet, die eine flächige Gaszuführung an die Gasdiffusionslage realisieren und für den Abtransport des erzeugten Wassers sorgen.

3.2 Chemische Grundlagen

3.2.1 Zellreaktion

Wird nun der Anode das Brenngas Wasserstoff und der Kathode das Oxidationsgas Sauerstoff zugeführt, entsteht zwischen beiden Elektroden eine Potentialdifferenz. An der Anode wird das Brenngas oxidiert und es entstehen H^+ -Protonen, die durch die Elektrolytmembran zur Kathode wandern. Die Elektronen fließen aufgrund der Potentialdifferenz über den äußeren Stromkreis von der Anode zur Kathode, wo der dort bereitgestellte Sauerstoff reduziert wird und das Reaktionsprodukt Wasser entsteht (vgl. Abb. 3-3).

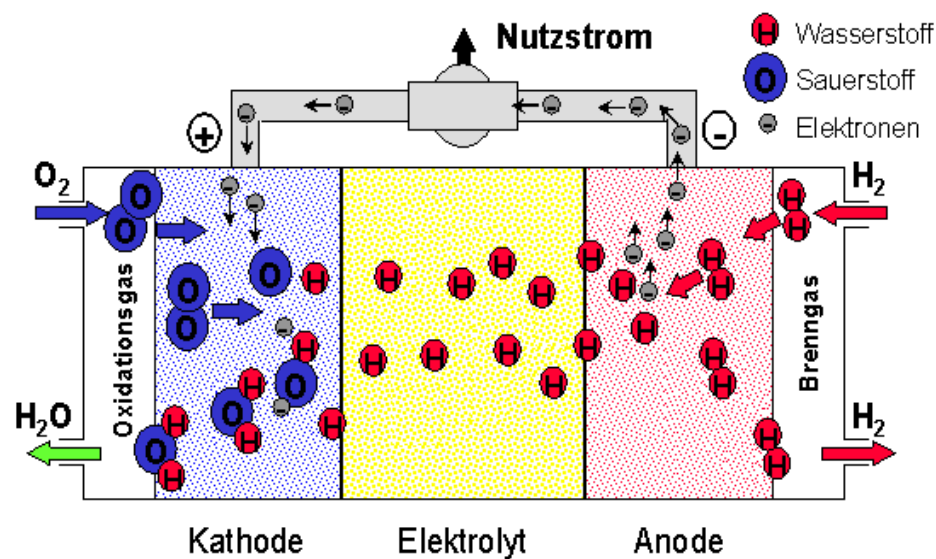
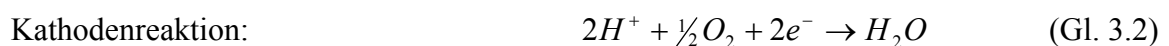


Abbildung 3-3: Chemische Zellreaktion der PEMFC nach [9]

Damit ergeben sich folgende Reaktionsgleichungen:



3.2.2 Gasumsatz und Stöchiometrie

Um nun aus der Gesamtreaktion nach Gleichung 3.3 eine aussagekräftige Größe zur Bestimmung des theoretischen Gasumsatzes einer PEM-Einzelzelle zu erhalten, ist die Angabe des **Gasvolumenstromes** ϕ in Litern pro Ampere und Minute sinnvoll.

Mit Hilfe der Faraday'schen Gesetze [2]

$$(1) \quad n = \frac{Q}{zF} \quad (\text{Gl. 3.4}),$$

$$(2) \quad F = e_0 N_A = 96485,3 \text{ As/mol} \quad (\text{Gl. 3.5}),$$

n: umgesetzte Stoffmenge $[n] = \text{mol}$

Q: transportierte Ladung $[Q] = \text{C}$

z: Ladungszahl pro Molekül

F: Faraday-Konstante

N_A : Avogadro-Konstante $[N_A] = 6,0221367 \cdot 10^{23} \text{ 1/mol}$

und dem Molvolumen eines idealen Gases ($V_{\text{mol}} = 22,414 \text{ l/mol}$) ergibt sich näherungsweise für den Gasvolumenstrom:

$$\varphi = \frac{1}{z \cdot F} \cdot V_{\text{mol}} \cdot \frac{60s}{\text{min}} \quad [\varphi] = \text{l/(A} \cdot \text{min)} \quad (\text{Gl. 3.6}).$$

Daraus ergibt sich mit der Ladungszahl $z = 2$ für Wasserstoff (vgl. Gl. 3.3) ein theoretisch umgesetzter Gasvolumenstrom von $7 \text{ ml/(A} \cdot \text{min)}$ und für Sauerstoff $3,5 \text{ ml/(A} \cdot \text{min)}$. Wird die Brennstoffzelle mit Luft anstelle von reinem Sauerstoff betrieben, muss durch den Molenbruch $x = 0,21$ geteilt werden, da in Luft 21 Vol.% Sauerstoff enthalten sind und man erhält $16,6 \text{ ml/(A} \cdot \text{min)}$ [8]. Dieser theoretische Gasbedarf für Anode und Kathode entspricht einem 100%igen **Gasumsatz u**. Da bei diesem Gasumsatz von 100% die Massen der an der Zellreaktion beteiligten Edukte (Ausgangsstoffe der Reaktion) und Produkte (erzeugte Stoffe) gleich sind, d.h. die Reaktion vollständig abläuft, spricht man hier auch von einer **Stöchiometrie** von $\lambda = 1$ [2]. Unter Stöchiometrie versteht man die Lehre von der mengenmäßigen Zusammensetzung chemischer Verbindungen und der mathematischen Berechnung chemischer Umsetzungen. Es gilt der Zusammenhang:

$$\lambda = \frac{1}{u} \cdot 100\% \quad (\text{Gl. 3.7})$$

λ : Stöchiometriefaktor $[\lambda] = 1$

u: Umsatz $[u] = \%$

Da jedoch in der Praxis nicht alle bereitgestellten Brenngase umgesetzt werden, ist der Umsatz immer kleiner als 100% und die Brennstoffzelle muss überstöchiometrisch, d.h. mit quantitativ mehr Edukten ($\lambda > 1$) betrieben werden.

3.3 Thermodynamische Grundlagen

Für die PEM-Brennstoffzelle lässt sich mit Hilfe der Thermodynamik und der Faraday'schen Gesetze (Gl. 3.4, Gl. 3.5) für energetische Betrachtungen die maximal erreichbare Zellspannung ermitteln. Die thermoneutrale oder auch **enthalpische Zellspannung** U_{th} berechnet sich für die Bildung von flüssigem Wasser aus Wasserstoff und Sauerstoff im Standardzustand bei $T_0 = 298,15\text{K}$ und $p_0 = 1,013\text{ bar}$ mit Hilfe des oberen Heizwertes für Wasserstoff $\Delta H_o^0 = -285,8\text{ kJ/mol}$ zu:

$$U_{th} = -\frac{\Delta H_o^0}{z \cdot F} = 1,48\text{V} \quad (\text{Gl. 3.8})$$

z : Anzahl der an der Reaktion beteiligten Elektronen ($z = 2$)

F : Faraday-Konstante

Die Reaktionen innerhalb der Brennstoffzelle sind reversibel. Eine Reaktion wird als reversibel bezeichnet, wenn nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik die maximal zur Verfügung stehende Energie in Arbeit –in diesem Fall elektrische Energie– umgewandelt wird, wobei die Reaktion isobar und isotherm abläuft [2].

Die freie Reaktionsenthalpie ΔG der Gesamtreaktion nach Gleichung 3.3 entspricht nun der elektrischen Arbeit, die maximal von der Brennstoffzelle abgegeben wird, wenn die Reaktanden und das Produktwasser bei derselben Temperatur (isotherm) und bei demselben Druck (isobar) zu- bzw. abgeführt werden. Im Standardzustand entspricht diese reversible Reaktionsarbeit $\Delta G_o^0 = -273,3\text{ kJ/mol}$ für flüssiges und $\Delta G_u^0 = -228,6\text{ kJ/mol}$ für gasförmiges Produktwasser [3]. Die maximale **reversible Zellspannung** U_{rev}^0 im Standardzustand ergibt sich somit zu:

$$U_{rev}^0 = -\frac{\Delta G_o^0}{z \cdot F} = 1,23\text{V} \quad (\text{Gl. 3.9})$$

Die Änderung der freien Reaktionsenthalpie ΔG lässt sich über das Gesetz von Gibbs bestimmen, welches eine Aussage ermöglicht, ob Reaktionen von selbst ablaufen, also in der Lage sind Arbeit zu leisten [16]:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (\text{Gl. 3.10})$$

ΔH : Reaktionsenthalpie $[\Delta H] = \text{J/mol}$

T : Reaktionstemperatur $[T] = \text{K}$

ΔS : Reaktionsentropie $[\Delta S] = \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$

Die Reaktionsenthalpie ΔH stellt den Energieumsatz während der chemischen Reaktion dar. Der Term $T \cdot \Delta S$ entspricht dem an Wärme gebundenen Anteil, der in Form von Reaktionswärme während der Zellreaktion abgegeben wird.

Die bisherigen Betrachtungen beziehen sich auf Normbedingungen. Ändert sich bei der Zellreaktion Druck und Temperatur der Gase, muss die reversible Zellspannung mit Hilfe der Nernst'schen Gleichung ermittelt werden, die Druck- und Temperaturabhängigkeit berücksichtigt [20]:

$$U_{rev}(T, p) = U_{rev}^0 + \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{p_{H_2} \cdot p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}} \right) \quad (\text{Gl. 3.11})$$

R: Gaskonstante $[R] = 8,314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$

T: Temperatur $[T] = \text{K}$

p_i : Partialdruck der Edukte und des Produktes $[p_i] = \text{bar}$

3.4 Kinetische Grundlagen

Die zuvor getroffenen Aussagen gelten für Brennstoffzellen im unbelasteten Zustand. Die oben errechnete reversible Klemmenspannung gilt somit nur, solange sich das System im thermodynamischen Gleichgewicht befindet. Sobald in den Stromkreis einer Brennstoffzelle ein elektrischer Verbraucher geschlossen wird, d.h. die Zelle belastet wird, fließt ein Strom und es treten diverse Überspannungen auf.

Der durch die Überspannungen auftretende **Spannungsverlust** ΔU setzt sich zusammen aus der Durchtritts-, Reaktions- und Transportüberspannung an der Kathoden- und an der Anodenseite sowie aus der Widerstandsüberspannung an der Membran-Elektroden-Einheit. Allgemein ergibt sich folgender Zusammenhang [3]:

$$\Delta U = \Delta U_{rev} + \Delta U_D + \Delta U_R + \Delta U_{Diff} \quad (\text{Gl. 3.12})$$

ΔU_{rev} : reversible Spannungsdifferenz ($U_{th} - U_{rev}$)

ΔU_D : Durchtrittsüberspannung

ΔU_R : Widerstandsüberspannung

ΔU_{Diff} : Diffusionsüberspannung

Einige Überspannungen zeigen ein nichtlineares Verhalten, wodurch sich ein typischer Kurvenverlauf für die Strom-Spannungs-Kennlinie (U/I-Kennlinie) ergibt, mit der eine Brennstoffzelle charakterisiert werden kann. Bei dieser Kennlinie wird die Zellspannung in Abhängigkeit der Stromstärke aufgezeichnet (vgl. Abb. 3-4).

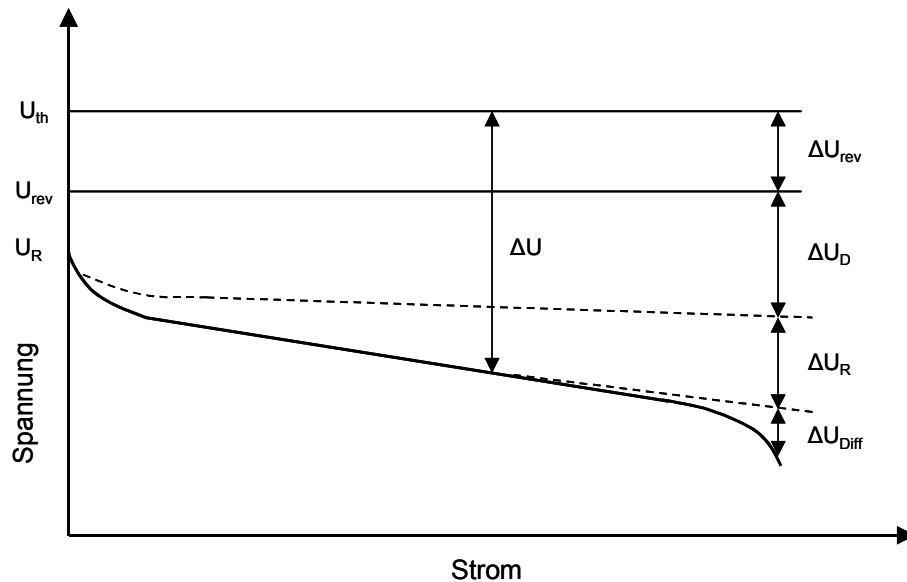


Abbildung 3-4: Schematische Darstellung einer U/I-Kennlinie

Zunächst fällt bereits im stromlosen Zustand auf, dass das messbare **Ruhepotential** U_R der Brennstoffzelle deutlich unterhalb der reversiblen Zellspannung U_{rev} von 1,23 V liegt. Diese Abweichung wird häufig auf die Bildung eines Mischpotentials an der Kathodenseite zurückgeführt, da an der Kathode gleichzeitig Sauerstoff reduziert und Platin oxidiert wird. Darüber hinaus wird auch die Oxidation von Verunreinigungen für die Ausbildung des Mischpotentials verantwortlich gemacht [3].

Wird die Brennstoffzelle zunächst leicht belastet, treten bei sehr geringen Stromdichten weitere Spannungsverluste ΔU_D auf, die aufgrund des Durchtritts der Elektronen durch die Phasengrenzfläche zwischen Elektrolyt und Elektrode verursacht werden. Steigert man nun die Stromstärke weiter, wird der Verlauf der Kennlinie zunehmend durch die Ohmschen Verluste ΔU_R in der Zelle bestimmt, weshalb in diesem Bereich der Kennlinie die Korrelation zwischen Strom und Spannung entsprechend dem Ohmschen Gesetz nahezu linear ist [3].

Bei höheren Strömen wird die Reaktionskinetik durch Diffusionsvorgänge (ΔU_{Diff}) begrenzt, da die Nachführung der Edukte mit geringerer Geschwindigkeit als die elektrochemische Reaktion erfolgt und die Zellspannung fällt somit schnell ab [8].

3.5 Leistung der Brennstoffzelle

Die elektrische Leistung einer Brennstoffzelle lässt sich über das Produkt aus Zellspannung und zugehöriger Stromstärke bestimmen:

$$P_{el} = U \cdot I \quad [P] = W \quad (\text{Gl. 3.13})$$

$$U: \text{Zellspannung im Betriebspunkt} \quad [U] = V$$

$$I: \text{Stromstärke im Betriebspunkt} \quad [I] = A$$

In der Praxis wird anstelle der Stromstärke meist die Stromdichte angegeben, da diese von der Größe der Zelle unabhängig ist und dadurch unterschiedliche Brennstoffzellen besser miteinander verglichen werden können.

$$j = \frac{I}{A} \quad (\text{Gl. 3.14})$$

$$j: \text{Stromdichte} \quad [j] = A/cm^2$$

$$I: \text{Stromstärke} \quad [I] = A$$

$$A: \text{aktive Elektrodenfläche} \quad [A] = cm^2$$

Damit ergibt sich für die Leistungsdichte p_A einer Brennstoffzelle:

$$p_A = U \cdot j \quad [p_A] = W/cm^2 \quad (\text{Gl. 3.15})$$

3.6 Wirkungsgrade

Aus den thermodynamischen Grundlagen lässt sich für die Brennstoffzelle ein **idealer Wirkungsgrad** ermitteln. Dieser wird auch als reversibler oder maximaler elektrischer Wirkungsgrad bezeichnet und folgt aus der freien Reaktionsenthalpie ΔG_o^0 , d.h. der maximal nutzbaren elektrischen Energie, bezogen auf die Reaktionsenthalpie ΔH_o^0 :

$$\eta_{\max} = \frac{\Delta G_o^0}{\Delta H_o^0} = - \frac{U_{rev}^0 \cdot z \cdot F}{\Delta H_o^0} \quad (\text{Gl. 3.16})$$

Unter Standardbedingungen beträgt dieser Wirkungsgrad $\eta_{\max} = 83,3\%$. Liegt das Produktwasser in der Gasphase ($\Delta G_u^0, \Delta H_u^0$) vor, so beträgt dieser Wert 94,5%.

Vergleicht man diesen idealen Brennstoffzellen-Wirkungsgrad mit dem Carnot-Wirkungsgrad herkömmlicher Wärmekraftmaschinen (siehe Kap. 1.1):

$$\eta_C = 1 - \frac{T_u}{T_o} \quad (\text{Gl. 3.17})$$

$$\begin{aligned} T_o: & \text{ obere Systemtemperatur} & [T_o] &= \text{K} \\ T_u: & \text{ Umgebungstemperatur} & [T_u] &= \text{K}, \end{aligned}$$

so wird deutlich, dass Brennstoffzellen nicht nur höhere Wirkungsgrade als ideale Carnot-Wärmekraftmaschinen erreichen, sondern diese auch über einen weiten Leistungsbereich halten können. Der Vergleich von Carnot-Wirkungsgrad und idealem Wirkungsgrad ist in Abbildung 3-5 in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt.

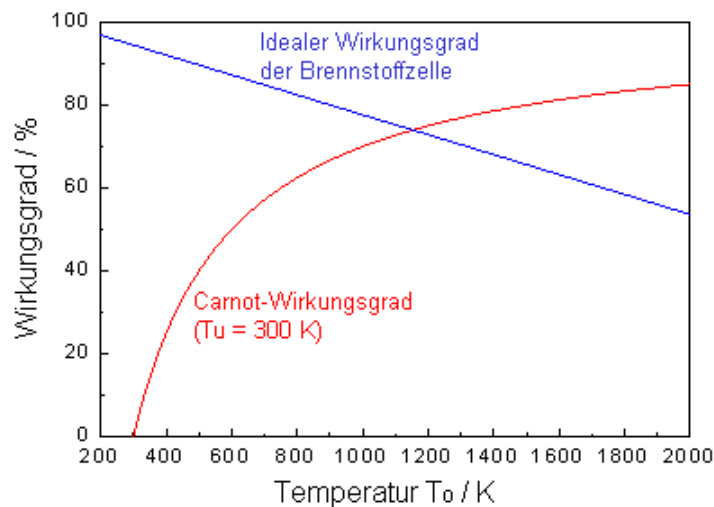


Abbildung 3-5: Vergleich Carnot-/Brennstoffzellen-Wirkungsgrad nach [9]

Die sich real einstellende Klemmenspannung ist aufgrund der im Innern der Brennstoffzelle ablaufenden nicht idealen Prozesse selbst im stromlosen Zustand niedriger als die bei dem jeweiligen Druck und Temperatur geltende reversible Zellspannung U_{rev} . Mit Hilfe des **Spannungswirkungsgrades** oder elektrochemischen Wirkungsgrades wird das Verhältnis der Zellspannung U am Betriebspunkt zur jeweiligen reversiblen Zellspannung U_{rev} dargestellt:

$$\eta_U = \frac{U}{U_{rev}} = -\frac{U \cdot z \cdot F}{\Delta G} \quad (\text{Gl. 3.18})$$

Der **Gesamtwirkungsgrad** oder praktische Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle berechnet sich damit allgemein für einen bestimmten Betriebspunkt bei einer Temperatur T und einem Druck p aus [3]:

$$\eta_{ges} = \eta_{max} \cdot \eta_U = -\frac{U \cdot z \cdot F}{\Delta H(T, p)} \quad (\text{Gl. 3.19})$$

Der praktische Wirkungsgrad darf jedoch nicht mit dem Wirkungsgrad eines Brennstoffzellen-Gesamtsystems verwechselt werden, der im Allgemeinen deutlich niedriger ist, da dieser zusätzlich noch die verschiedenen Wirkungsgrade der weiteren Systemkomponenten sowie die Brennstoffausnutzung berücksichtigt.

So kann z.B. die Brennstoffausnutzung über den **Faraday-Wirkungsgrad**, bzw. Stromwirkungsgrad angegeben werden. Dieser stellt den Bruchteil des Stoffmengenstroms N_i des Reaktanden i dar, der durch elektrochemische Reaktion zum Stromfluss I beiträgt [3]:

$$\eta_{I,i} = \frac{I}{I_m} = \frac{I}{z \cdot F \cdot N_i} \quad (\text{Gl. 3.20})$$

I : von der Zelle gelieferter Strom

I_m : theoretischer elektrischer Strom entsprechend dem Brenngasverbrauch

N_i : Stoffmengenstrom des Reaktanden i $[N_i] = \text{mol/s}$

3.7 Einflussgrößen und Betriebsparameter

Neben den rein theoretischen thermodynamischen und kinetischen Faktoren, welche die Leistung einer Brennstoffzelle einschränken, gibt es einige technische und konstruktive Parameter, die die Charakteristik einer Brennstoffzelle und damit die Kennlinien verändern. Auf die wichtigsten soll hier kurz eingegangen werden.

So stellen inzwischen mehrere Firmen gute **Membranen** und komplette MEAs her, die Entwicklung ist jedoch noch lange nicht abgeschlossen, da immer noch Forschungsbedarf in Bezug auf Haltbarkeit, mechanische Stabilität, Stromdichte usw. besteht [8].

Auch ist die notwendige teure und aufwendige **Katalysatorbelegung** in den letzten Jahren stark reduziert worden, jedoch ist die Optimierung und die Entwicklung neuer Katalysatormaterialien noch nicht am Ende angelangt.

Polymermembranen leiten Protonen nur im befeuchteten Zustand. Da die Leitfähigkeit linear vom Wassergehalt der Membran abhängt, stellt das **Wassermanagement** eine wichtige Einflussgröße im Betrieb einer Brennstoffzelle dar. Dazu gehört auch die Optimierung der **flow fields** in den Bipolarplatten. Es müssen Strukturanordnungen gefunden werden, die sowohl für eine möglichst gute und gleichmäßige Gasverteilung sorgen, als auch das entstehende überschüssige Wasser ohne allzu großen Druckabfall aus der Zelle abführen können.

Wird eine Brennstoffzelle jedoch mit **erhöhtem Gasdruck** betrieben, kann das Produktwasser besser aus den Gasverteilungszonen ausgetragen werden, was sich somit positiv auf das oben genannte Wassermanagement auswirkt.

Ein weiterer wichtiger Parameter stellt die **Zelltemperatur** dar. Zwar nimmt die theoretische Zellspannung mit zunehmender Temperatur ab, jedoch erreicht die Brennstoffzelle ihr Leistungsmaximum aufgrund der steigenden Reaktionsgeschwindigkeit bei Betrieb im Bereich von 50°C bis 80°C [8], wodurch auch auf das korrekte Temperaturmanagement geachtet werden muss.

In Zusammenhang mit den Reaktionsgasen lässt sich beobachten, dass die **Art und Reinheit der Gase** eine erhebliche Rolle spielt. Vor allem bei Verunreinigungen des Wasserstoffs mit Schwefel und CO, welches besonders bei Verwendung von Reformatgas zum Tragen kommt, reagiert die PEM-Brennstoffzelle mit Leistungseinbußen.

3.8 Degradation und Langzeitverhalten

Die zuvor erwähnten Einflussfaktoren lassen ausschließlich Aussagen über die momentane Leistungsfähigkeit einer Brennstoffzelle zu, ermöglichen jedoch keine eindeutigen Rückschlüsse auf Alterungsprozesse, Leistungsverluste mit der Zeit oder gar Ausfallmechanismen. Die aktuelle PEFC-Technologie weist in der Praxis einen Leistungsverlust von ca. 5 bis 10 %/1000h auf [7]. Bisher sind jedoch nur einige wenige Erscheinungen bekannt, die wesentliche Degradationen bei PEM-Brennstoffzellen hervorrufen. Diese Faktoren der Zelldegradation sollen im Folgenden kurz aufgezeigt werden.

- Durch die Verwendung korrodierender metallischer Bauteile wie Bipolarplatten (vgl. Abb. 3-6), Dichtungsmaterialien und Gasanschlüsse und der daraus mit der Zeit entstehenden Korrosionsprodukte wird die Ionenwanderung durch die Membran blockiert. Diese Kontaminationen durch Metallionen haben auf die Leitfähigkeit und die Integrität von Nafionmembranen einen entscheidenden Einfluss. So weiß man von anderen Membranprozessen, wie Elektrolyse und Elektrodialyse, dass z.B. Ca^{2+} und Al^{3+} -Spuren im ppm-Bereich zu Membranzerstörung führen [7].

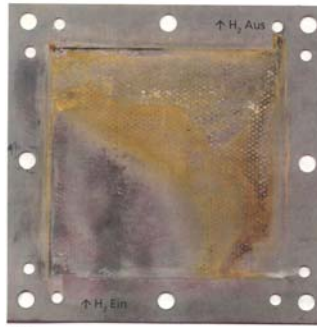


Abbildung 3-6: Korrodierte Bipolarplatte (anodenseitig) [4]

- Durch mangelhafte Befeuchtung und bei hoher Temperatur im Betrieb werden chemische und elektrochemische Degradationsprozesse an der Elektrolytmembran in Gang gesetzt. Hierbei bestehen Unterschiede zwischen fluorierten Materialien wie z.B. Nafion und nicht fluorierten Membranen entsprechend ihrer chemischen Struktur. So kommt es unter anderem zur Ablösung (Delamination) der katalytischen Schicht von der Elektrolytmembran in der Membran-Elektroden-Anordnung.
- Die im Brenngas und der Umgebungsluft zum Teil enthaltenen Spurenbestandteile wie Schwefel und CO haben einen negativen Einfluss auf die Katalysatoren und Elektrolyten der MEA, indem sie zu irreversiblen Degradationsprozessen führen. So werden z.B. durch Schwefel aus dem Brenngas und aus dem Kohlenstoffträger des Katalysators die Katalysatorpartikel deaktiviert und die Membran vergiftet [7].
- Die elektrochemische Belastung beim Betrieb hat nicht nur Auswirkungen auf die Polymerverbindungen in den Brennstoffzellenelektroden, sondern auch auf den Katalysator. Aus Tiefenprofilmessungen an der Wasserstoffelektrode ist bekannt, dass die Platinkonzentration an der Elektrodenoberfläche und dem in den Tiefenprofilmessungen zugänglichen Oberflächenbereich nach längerem Betrieb auf weniger als 1/20 der ursprünglichen Konzentration abgenommen hat [4]. Diese Abnahme der Platinkonzentration zeigt, dass das Platin in Gegenwart von Wasserstoff eine erhöhte Mobilität besitzt und sich vergrößerte Platinpartikel gebildet haben, die einen deutlich kleineren Oberflächenanteil besitzen als die ursprüngliche hochdisperse Platinverteilung auf dem Kohlenstoffträger. Diese Alterung des Katalysators hat deutliche Leistungseinbrüche zur Folge.

Insgesamt ist zu sagen, dass bisher meist nur ein bestimmter Typ einer Zelldegradation vermutet wurde, aber eine Einschätzung der Bedeutung verschiedener Mechanismen für eine langlebige PEFC wurde ebensowenig vorgenommen wie eine systematische Untersuchung der Degradationsvorgänge [14]. Jedoch ist aus Voruntersuchungen an Alkalischen Brennstoffzellen (AFC) bekannt, dass die Zelldegradation keineswegs auf einzelne bestimmte Faktoren zurückzuführen ist, sondern eine Kombination der einzelnen Degradationsmechanismen darstellt [7].

3.9 Beschleunigte Alterungstests

Wie bei jedem Produkt, System oder Bauteil werden auch bei den Brennstoffzellen im Normalbetrieb die Auswirkungen der Degradation erst nach längerer Laufzeit ersichtlich. Die Analyse der Degradationsmechanismen gestaltet sich somit recht schwierig und langwierig. Will man jedoch systematische Untersuchungen und Einschätzungen innerhalb einer angemessenen Zeitspanne vornehmen, ist es notwendig die Auswirkungen der Degradation zu beschleunigen und voranzutreiben. In sogenannten beschleunigten Alterungstests wird darum das Testobjekt (hier Brennstoffzelle) unter kontrollierten Extrembedingungen betrieben, wodurch die Degradationsprozesse schneller ablaufen als unter normalen Bedingungen.

3.9.1 Vorüberlegungen

Vorgehensmuster zur Bestimmung, Aufklärung und Beurteilung der Degradationsprozesse (nach Kapitel 3.8) müssen basierend auf theoretischen Vorüberlegungen festgelegt werden. Da die Brennstoffzellenforschung ein noch recht junges Forschungsgebiet darstellt, bietet sich an, vergleichbare Vorgehensweisen zur Bestimmung der Alterungsprozesse auf anderen Gebieten zu suchen.

So wird z.B. in der Automobilindustrie oder bei der Herstellung elektronischer Bauteile mit beschleunigten Lebensdauertests gearbeitet, um Lebensdauer und Ausfallzeit der jeweiligen Komponenten zu untersuchen. Da es sich in diesen Fällen jedoch meist nur um einige wenige Einflussfaktoren wie Temperatur und Feuchtigkeit handelt, sind diese Vorgehensweisen nur eingeschränkt auf das relativ komplexe System der Brennstoffzelle übertragbar. Auch sind diese Alterungstests in der Theorie recht vereinfacht und von Firma zu Firma verschieden, so dass diese meist auf längere praktische Erfahrungswerte

zurückgreifen und daraus ihre Testverfahren kontinuierlich anpassen und verbessern können.

Da es für Brennstoffzellen weder klare theoretische Vorgehensmuster noch praktische Erfahrungswerte gibt, um beschleunigte Alterungstests erfolgreich und aussagekräftig zu entwickeln, müssen diese beiden grundlegenden Faktoren zuerst erarbeitet werden.

3.9.2 Konventionen

In der Literatur lässt sich eine Vielzahl an theoretischen Ansätzen und Modellen zu beschleunigten Lebensdauertests finden. Diese Modelle zu sogenannten **Accelerated Life Tests (ALT)** oder **Physical Acceleration** unterscheiden sich im theoretischen Grundgedanken kaum voneinander.

So versteht man allgemein unter „Beschleunigten Alterungstests“ oder „Physikalischer Beschleunigung“, dass das Testobjekt mit erhöhter Belastung, wie hoher Temperatur, Spannung oder Feuchtigkeit betrieben wird. Diese genau zu definierenden Überbelastungen führen dazu, dass Fehler oder Degradationsmechanismen (mechanische Ermüdung, Korrosion, chemische Reaktionen, Diffusion, usw.) am Objekt auftauchen, die sich auch bei gewöhnlicher Belastung ergeben würden, allerdings in einem verkürzten Zeitrahmen [11,12].

Aus den gesammelten Testdaten während eines Belastungsvorganges lassen sich dann mit Hilfe eines theoretischen Modells Aussagen über Zuverlässigkeit, Fehlerraten oder sogar explizit über Degradationsmechanismen selbst machen.

Die Schwierigkeit besteht jedoch darin, eben genau diese Überbelastungen (engl.: stresses) in der Praxis mit speziell entwickelten Tests umzusetzen. Für gewöhnlich sollten die Belastungslevel so gewählt werden, dass sie zwar die Degradation des Objektes stimulieren, nicht jedoch Fehler hervorrufen, die im normalem Betrieb überhaupt nicht auftreten würden. Abbildung 3-7 zeigt, dass sich die Belastungen über die Eignungsgrenzen (engl.: specification limits) und Funktionsgrenzen (engl.: design limits) hinweg im Rahmen der Zerstörungsgrenzen (engl.: destruction limits) des Testobjektes bewegen können.

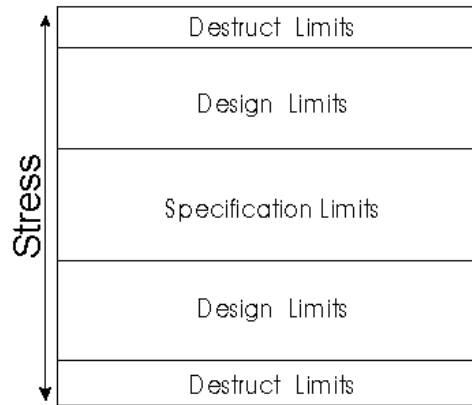


Abbildung 3-7: Maximaler Belastungsbereich für Testobjekte [11]

Weiterhin unterscheidet man zwischen **zeitunabhängiger** und **zeitabhängiger Belastung**. Wird das Testobjekt über den gesamten Zeitraum konstant belastet, so spricht man von zeitunabhängiger Belastung (vgl. Abb. 3-8).

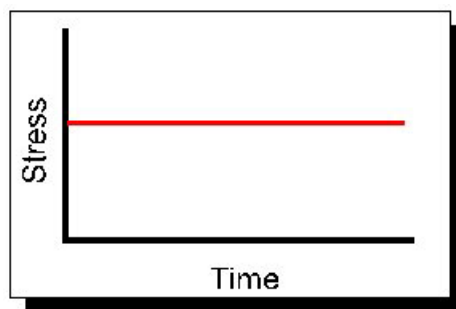


Abbildung 3-8: Konstante Belastung über die Zeit [11]

Diese Art der Belastung hat den Vorteil, dass sie sich sehr leicht in die Praxis umsetzen lässt. Außerdem sind die meisten Produkte dafür ausgelegt, mit konstanter Belastung zu arbeiten und die Degradationsmechanismen lassen sich somit relativ leicht quantifizieren.

Variiert die Belastung mit der Zeit, so spricht man von zeitabhängiger Belastung. Für diesen Fall gibt es mehrere Möglichkeiten, wie stufenweise Erhöhung des „stress levels“, rampenförmige oder progressive Erhöhung oder komplett willkürlicher Verlauf der Belastung (vgl. Abb. 3-9).

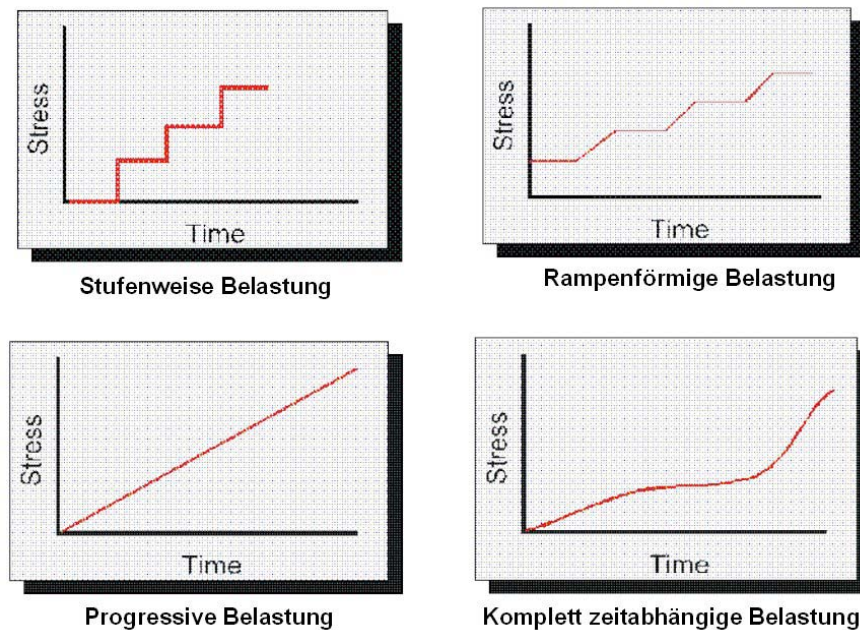


Abbildung 3-9: Verschiedene zeitabhängige Belastungsverläufe [11]

Wird das Testobjekt veränderlichen Belastungsniveaus ausgesetzt, treten Fehler und Degradationsmechanismen viel schneller auf als bei konstanter Belastung. Jedoch sind theoretische Modelle dafür nur schwer zugänglich. In der Praxis zieht man darum die zeitunabhängige Belastung vor, da hierfür schon weit verbreitete Modelle existieren, die empirisch bestätigt und darum zuverlässiger sind [11].

3.9.3 Beschleunigungsmodelle

Geht man von einer linearen Beschleunigung der Alterung aus, die proportional zur verstrichenen Zeit voranschreitet, so ist die Höhe der Belastung umgekehrt proportional der Zeit, mit der das Testobjekt bis zum Auftreten der entsprechenden Fehler oder gar bis zum Ausfall betrieben wird. Daraus ergibt sich ein Beschleunigungsfaktor, sog. **Acceleration Factor (AF)**. Multipliziert man die Zeit bis zum Ausfall bei erhöhter Belastung mit diesem Faktor, so erhält man die tatsächliche Lebensdauer des Testobjektes bei Betrieb mit gewöhnlicher Belastung. Damit lässt sich folgende Beziehung aufstellen, die hier mit englischsprachigen Indizierungen dargestellt ist [12]:

$$AF = \frac{t_u}{t_s} \quad (\text{Gl. 3.21})$$

t_u : time to fail at use (Ausfallzeit bei gewöhnlicher Belastung)

t_s : time to fail at stress (Ausfallzeit bei erhöhter Belastung)

Anzumerken ist, dass sich ein einziger Beschleunigungsfaktor nie auf mehrere Fehlermechanismen beziehen lässt. Der Degradationsprozess setzt sich aus mehreren solcher Fehlermechanismen zusammen, die unterschiedlich großen Einfluss auf den physikalischen Alterungsprozess haben und darum jeweils einen eigenen Beschleunigungsfaktor besitzen. So müssen diese Faktoren bei der Analyse von Daten zur Bestimmung der Degradation nach Fehlermechanismen getrennt ermittelt werden [12].

Da es sich recht mühsam gestaltet, für jeden einzelnen Fehlermechanismus den entsprechenden Beschleunigungsfaktor zu ermitteln und in Beziehung zueinander zu stellen, geht man dazu über, komplette Modelle zu entwickeln, die die Zeit bis zum Ausfall des Objektes als Funktion der Belastung darstellen [12].

Allgemein lässt sich schreiben:

$$t_f = G(S) \quad (\text{Gl. 3.22})$$

t_f : time to fail (Ausfallzeit)

$G(S)$: Modellgleichung für ein beliebiges
Belastungsniveau (stress level S)

Damit berechnet sich allgemein der Beschleunigungsfaktor zwischen zwei Belastungsebenen S_1 und S_2 aus [12]:

$$AF = \frac{G(S_1)}{G(S_2)} \quad (\text{Gl. 3.23}).$$

Diese meist empirisch ermittelten Beschleunigungsmodelle werden für gewöhnlich näherungsweise aus physikalischen oder kinetischen Modellen abgeleitet, die auf den entsprechenden Degradationsmechanismen basieren. Je besser man die Theorie dieser Fehlermechanismen kennt, desto genauer wird auch das Beschleunigungsmodell. Im Folgenden soll kurz auf Modelle eingegangen werden, die auf die Theorie der Brennstoffzelle übertragbar sind:

Arrhenius-Modell

Dieses frühe empirische Beschleunigungsmodell wurde in Anlehnung an den vom schwedischen Chemiker Arrhenius im Jahr 1887 beschriebenen Einfluss der Temperatur auf die Reaktionsgeschwindigkeit entwickelt [11,12]:

$$t_f = A \cdot \exp\left(\frac{\Delta E_a}{k \cdot T}\right) \quad (\text{Gl. 3.24})$$

A: Skalierungsfaktor

ΔE_a : Aktivierungsenergie $[\Delta E_a] = \text{eV}$

k: Boltzmann-Konstante $[k] = 8,617 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$

T: Temperatur $[T] = \text{K}$

Der Wert der Aktivierungsenergie ΔE_a hängt ab vom jeweiligen Degradationsmechanismus und den entsprechend daran beteiligten Materialien. Üblicherweise liegen die Werte zwischen 0,3 eV und 1,5 eV oder sogar höher.

Berechnet man nun gemäß Gleichung 3.23 den Beschleunigungsfaktor allgemein für die Temperaturen T_1 und T_2 , kürzt sich der unbekannte Skalierungsfaktor heraus und es ergibt sich:

$$AF = \exp\left[\frac{\Delta E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right] \quad (\text{Gl. 3.25})$$

Das Arrhenius-Modell besitzt somit nur den kritischen Parameter der Aktivierungsenergie und ist sehr gut anwendbar auf Fehlermechanismen, die mit chemischen Reaktionen, Diffusions- oder Migrationsvorgängen zu tun haben [12].

Eyring-Modell

Dieses Modell stellt eine Weiterentwicklung des Arrhenius-Modells dar. Es basiert auf Theorien der Chemie und Quantenmechanik und wird besonders dann verwendet, wenn mehrere Belastungsarten vorhanden sind.

Aufbauend auf dem Arrhenius-Modell ergibt sich nun folgende Gleichung, welche zusätzlich zur Temperatur eine weitere Belastungsart einschließt [12]:

$$t_f = A \cdot T^\alpha \cdot \exp\left[\frac{\Delta E_a}{k \cdot T} + \left(B + \frac{C}{T}\right) \cdot S_1\right] \quad (\text{Gl. 3.26})$$

α , B, C sind Parameter, welche die Degradationsbeziehungen zwischen den verschiedenen Belastungskombinationen bestimmen.

S_1 ist eine zusätzliche Belastungsfunktion, wie Spannung, Strom oder ähnliches. Die weiteren Parameter sind dem Arrhenius-Modell zu entnehmen.

Sobald eine zusätzliche Belastung hinzukommt, erweitert sich die Gleichung folgendermaßen [12]:

$$t_f = A \cdot T^\alpha \cdot \exp \left[\frac{\Delta E_a}{k \cdot T} + \left(B + \frac{C}{T} \right) \cdot S_1 + \left(D + \frac{E}{T} \right) \cdot S_2 \right] \quad (\text{Gl. 3.27})$$

Wie aus der Gleichung 3.27 zu entnehmen ist, haben die verschiedenen Belastungsarten keine gemeinsamen Terme, wodurch eine relative Änderung einer speziellen Belastung keine Auswirkungen auf die übrigen Belastungslevels hat. In der physikalischen Realität können einzelne Belastungsänderungen allerdings Auswirkungen auf andere Belastungsgrade haben, jedoch ist die Vereinfachung nach Gleichung 3.27 für eine erste Näherung ausreichend [11,12].

Das Eyring-Modell beschreibt zwar den Einfluss der Temperatur und beliebiger weiterer temperaturunabhängiger Faktoren, jedoch allein mit zwei involvierten Belastungsarten sind fünf unbekannte Parameter zu bestimmen (vgl. Gl. 3.27) und bei jeder weiteren Belastungsart kommen zwei Parameter hinzu. So verlangt die Praxis nach vereinfachten, jedoch genügend genauen Modellen nach dem Prinzip von Eyring.

In der Literatur sind für einige Spezialfälle Modelle zu finden, die alle auf dem Eyring-Modell aufbauen und vereinfachte Terme für die jeweiligen Belastungsarten besitzen.

Wie zuvor erläutert (siehe Kap. 3.8) sind die drei hauptsächlichen Einflussfaktoren der Degradation einer Brennstoffzelle Temperatur, Spannung und Feuchtigkeit. So lässt sich ein vereinfachtes Modell finden, welches genau diese Belastungsarten berücksichtigt und immer noch genügend genau ist, das sogenannte **Three-Stress-Model**.

Hierbei wird in Gleichung 3.27 vereinfachend $\alpha = 0$, $C = 0$ und $E = 0$ gesetzt, da diese Parameter erst in zweiter Linie die Einflüsse unter den einzelnen Belastungsarten darstellen und somit in erster Näherung vernachlässigbar sind [12]. Mit der Wahl weiterer, meist empirisch bestätigter Parameter vereinfacht sich die Gleichung zu:

$$t_f = A \cdot \exp \left(\frac{\Delta E_a}{k \cdot T} \right) \cdot V^{-\beta} \cdot RH^{-\gamma} \quad (\text{Gl. 3.28})$$

wobei folgende Beziehungen gelten:

$$S_1 = \ln V, S_2 = \ln RH$$

$$B = -\beta, D = -\gamma$$

V: Spannung (engl. Konvention)

RH: relative Feuchte

Obwohl mit dem vereinfachten Eyring-Modell nach Gleichung 3.28 nur noch vier unbekannte Parameter bei drei Belastungsarten ermittelt werden müssen, ist ein umfangreicher experimenteller Aufwand notwendig, um das Modell entsprechend anzupassen.

4 Konzeption des Teststandes

Ziel des experimentellen Aufbaus ist es, die charakteristischen physikalischen Parameter der Test-Brennstoffzelle zu erfassen. Aufbauend auf den theoretischen Erkenntnissen und Randbedingungen (wie in den vorherigen Kapiteln erläutert) wurde darum ein Teststand konzipiert, der in der Lage ist, die wichtigen Einflussfaktoren wie Gasdruck, Gasfeuchte, Gaszusammensetzung, Temperatur- und Leistungsverhalten der Brennstoffzelle zu untersuchen und zu bestimmen.

4.1 Allgemeine Anforderungen und Randbedingungen

Die praktischen Randbedingungen für die Auslegung des Teststandes ergeben sich zum Teil aus Absprachen mit den Projektpartnern und deren Vorgaben sowie aus institutsinternen Erfahrungswerten und Gegebenheiten.

So werden dem FhG ISE -wie jedem Projektpartner- zwei baugleiche Brennstoffzellen vom ZSW zur Verfügung gestellt, die in den Teststand integriert werden sollen (vgl. Kap. 4.2). Aus Kostengründen werden beide Zellen nicht in einer parallelen Anordnung integriert, sondern nacheinander mit Gas durchströmt, was mit einer einzigen Gasdosierungseinrichtung realisiert werden kann.

Von den beiden Brennstoffzellen soll nur die zweite mit einer elektronischen Last belastet werden, während sich die erste im Leerlauf befindet. Damit kann die Degradation, die durch die Durchströmung der ersten Zelle mit Gas verursacht wird, von der unter Last auftretenden Degradation in der zweiten Zelle unterschieden werden. Da die unbelastete Zelle zuerst durchströmt wird, erreicht man nahezu den selben thermodynamischen Zustand am Eintritt der beiden Zellen. Um dies zu überprüfen, ist vor Eintritt in die zweite Zelle die Temperatur des Gasstromes zu messen [14].

In weiteren Projekttreffen wurde mit den Projektpartnern vereinbart, kathodenseitig Luft anstelle von reinem Sauerstoff zu Messzwecken zu verwenden. Zur Untersuchung des Einflusses von verschiedenen Wasserstoffkonzentrationen auf die Degradationsmechanismen soll dem Wasserstoff anodenseitig Stickstoff zugeführt werden, um die gewünschte Verdünnung zu erhalten.

Da der Aufbau der Elektrolytmembran eine Temperaturbelastung von maximal 130°C erlaubt, ist der Teststand auf diese Temperatur auszulegen, um den Einfluss erhöhter Prozesstemperaturen auf die Degradation untersuchen zu können.

Weiterhin ist zur Bestimmung der Auswirkungen unterschiedlicher Feuchtgrade anoden- und kathodenseitig eine Befeuchtung der Gase von 0 bis 100% relativer Feuchte zu realisieren.

Um nun effektive Langzeittests durchführen zu können sowie die Messwerte zu erfassen und auszuwerten, ist eine vollständige Automatisierung erforderlich. Darum soll der Teststand mittels eines Messplatzrechners und eines Datenloggers automatisiert und gesteuert werden. Als Automatisierungssoftware soll LabVIEW™ von NATIONAL INSTRUMENTS™ verwendet werden.

Abbildung 4-1 zeigt eine schematische Darstellung des Teststandes.

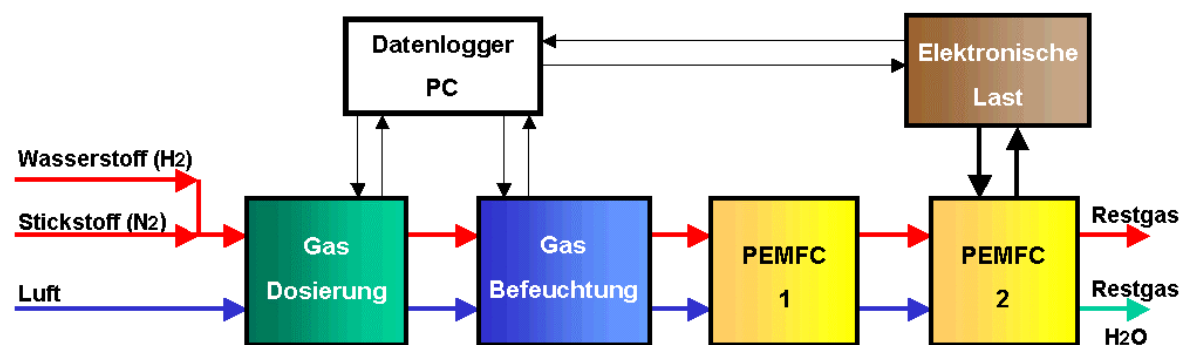


Abbildung 4-1: Schema des Brennstoffzellen-Teststandes

Die Verrohrung des Teststandes (Gaszuleitung und -verteilung) wurde komplett mit Edelstahlrohren (Durchmesser 6 mm, Wandstärke 1 mm) ausgeführt und mit Swagelok®-Komponenten gasdicht verschraubt.

Nachfolgend werden die wichtigsten Komponenten des Teststandes sowie deren technische Umsetzung beschrieben.

4.2 Brennstoffzellen

Wie zuvor erwähnt (siehe Kap. 4.1) wurde in Absprache mit den Projektpartnern eine Standardzelle vom ZSW entwickelt, die jedem Projektpartner zugeschickt wurde, um eine einheitliche Basis der Langzeitmessungen zu erhalten. Abbildung 4-2 zeigt den schematischen Aufbau der Testzelle, deren äußere Abmessungen 9x9x4 cm und die aktive Membranfläche im Inneren der Zelle ca. 25 cm² beträgt. Auf Composit-Materialien in der Zelle wurde bewusst verzichtet und darum die Bipolarplatten aus reinem Graphit gefertigt,

um Verunreinigungen durch Korrosionsprodukte o.ä. im Laufe der Zeit auszuschließen [14].

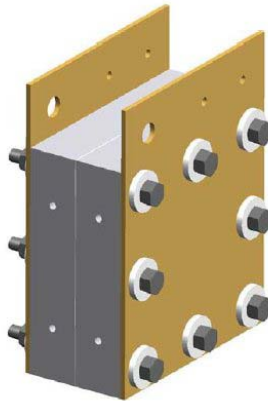


Abbildung 4-2: Schematische Darstellung der Testzelle [ZSW]

Um benötigte Messgeräte und die elektronische Last besser anschließen zu können, sind außen an den graphitischen Bipolarplatten noch Stromabnehmerplatten aus vergoldetem Kupfer befestigt. An beiden Seiten der Testzelle sind auf die Stromabnehmerplatten zusätzlich Silikon-isolierte, wasserdichte Heizelemente mit einer Heizleistung von jeweils 60 W angebracht, um eine gleichmäßige Temperierung der Zelle zu ermöglichen.

Für die Abdichtung der Zelle können Dichtungen aus Teflon[®] oder Viton[®] eingesetzt werden. Im Rahmen einer parallelen Diplomarbeit am FhG ISE [13] wurde speziell für diese Zelle ein Dichtungskonzept mit Viton[®] entwickelt, welches eine optimale Abdichtung der Zelle bei gleichmäßigem Anpressdruck ermöglicht.

In den Endplatten aus Graphit befindet sich das Flowfield, welches die Reaktionsgase gleichmäßig auf die Fläche verteilen soll (vgl. Abb. 4-3). Am oberen und unteren Ende sind fünf Ein- und Austritte zu erkennen. Die Kanäle werden jeweils zweimal umgelenkt. Die Kanalbreite beträgt 1 mm und vergrößert sich nach der zweiten Umlenkung auf 1,25 mm. Die Tiefe der Kanäle beträgt 0,8 mm [14].

In Abbildung 4-3 ist schematisch das Dichtungskonzept mit Viton[®] und eine Endplatte aus Graphit mit Flowfield dargestellt.

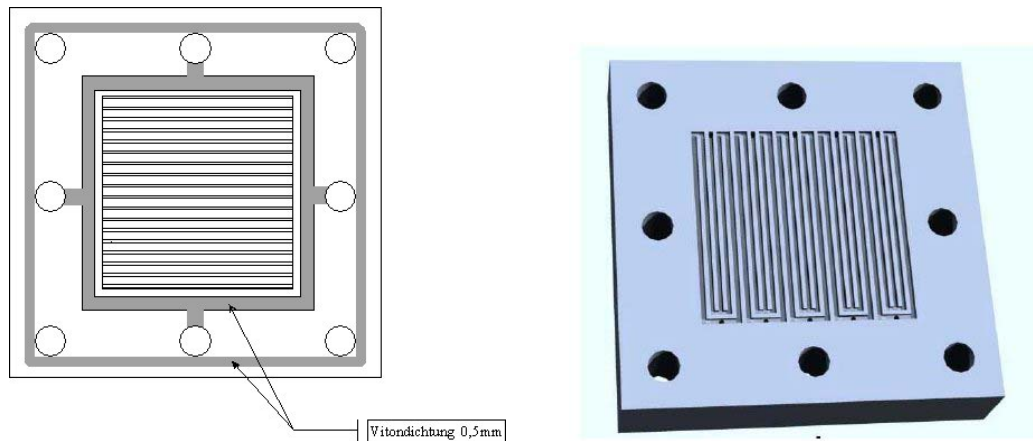


Abbildung 4-3: Dichtungskonzept mit Viton® [13] und Endplatte mit Flowfield [ZSW]

4.3 Gasdosierung

Damit die PEM-Brennstoffzellen mit ausreichend Gas versorgt werden können und um vergleichbare Messergebnisse zu erhalten, ist ein reproduzierbarer Gasvolumenstrom notwendig. Es muss sichergestellt werden, dass anodenseitig eine definierte Zumischung von Stickstoff gewährleistet ist, die es ermöglicht einen Wasserstoffvolumenstrom theoretisch mit einem Stickstoffanteil von bis zu 100% einzustellen.

Da aus Kostengründen keine vorgefertigte Gasbefeuchtungseinheit verwendet werden kann, wird mit Hilfe der Gasdosierung auch das Gasbefeuchungskonzept (genauer erläutert in Kap. 4.4) realisiert. Um anoden- sowie kathodenseitig eine Befeuchtung von bis zu 100% zu erhalten, wird dabei jeweils der Gasvolumenstrom in einen „trockenen“ und einen „feuchten“ Gasstrom aufgeteilt. Durch die definierte Mischung beider Gasströme ist es dann möglich, einen Feuchtegradbereich von 0 bis 100% relativer Feuchte abzudecken.

Damit die zu vermessenden Brennstoffzellen auch nach Einbeziehen der Wirkungsgradverluste und der Stöchiometriefaktoren noch mit genügend Gas versorgt werden können, ist nach Absprache mit dem Zellenhersteller ZSW und den übrigen Projektpartnern ein maximaler Gasvolumenstrom von 2 l_n/min Luft und 1 l_n/min Wasserstoff bzw. Stickstoff ausreichend.

Bei der Auswahl der dafür notwendigen Gasvolumenstromregler wurde auf institutsinterne Erfahrungswerte zurückgegriffen. Digitale Massendurchflussmesser/-regler (digital mass-flow meter/controller) der Firma BRONKHORST HI-TEC (vgl. Abb. 4-4) haben sich hier als besonders geeignet erwiesen.



Abbildung 4-4: Digitaler Massendurchflussregler EL-FLOW [17]

Diese Durchflussregler besitzen ein integriertes Regelventil und arbeiten nach dem Prinzip der thermischen Massendurchflussmessung, welches gegenüber herkömmlichen Verfahren, die Strömungsgeschwindigkeit, Volumenstrom oder Differenzdruck messen, wesentlich genauer ist, da die Masse eines Gases auch bei Temperatur- oder Druckänderungen stets konstant bleibt. Da die meisten Anwender jedoch mit Volumeneinheiten arbeiten, wird der Massendurchfluss auf Normbedingungen ($T = 0^\circ\text{C}$ und $p = 1,013 \text{ bar}$) bezogen in Volumen umgerechnet und die Regler geben so den Volumenstrom pro Minute ($\text{l}_\text{n}/\text{min}$) an.

Wie Abbildung 4-5 erkennen lässt, wird bei diesem Messprinzip ein Teil der Gasmenge über einen Messbereichseinsatz, sog. Laminarströmungseinsatz, im Hauptstrom parallel zu einer durch eine Heizung erwärmte Kapillare geleitet, wobei eine Druckdifferenz entsteht. Der Laminarströmungseinsatz ist jedoch so konzipiert, dass die Durchflussbedingungen in der Kapillare und dem Laminarpaket vergleichbar sind, was zu proportionalen Durchflussraten über die gesamte Messspanne führt. Der Temperaturunterschied ΔT , der durch Temperatursensoren in der Kapillare gemessen wird, ist abhängig von der Wärmemenge, die vom Gasfluss aufgenommen wird [17].

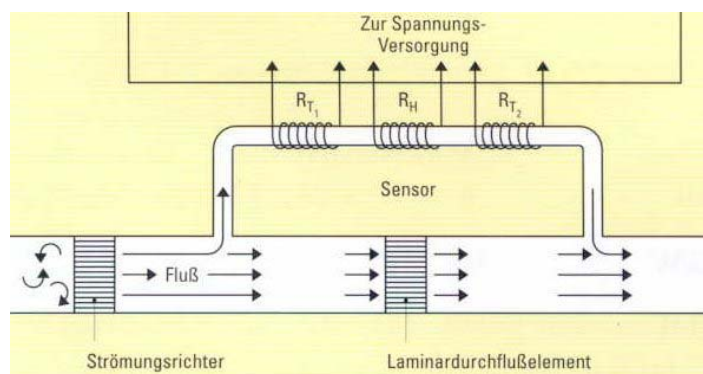


Abbildung 4-5: Messprinzip der thermischen Massendurchflussmessung [17]

Der Zusammenhang zwischen Gasmengenfluss und gewandeltem Ausgangssignal kann damit durch folgende Gleichung ausgedrückt werden [17]:

$$V_{Signal} = K \cdot c_p \cdot \phi_m = K \cdot c_p \cdot \rho \cdot \phi_v \quad (\text{Gl. 4.1})$$

K: konstanter Faktor

c_p : spezifische Wärmekapazität $[c_p] = \text{J/K} \cdot \text{kg}$

ρ : Dichte des Gases $[\rho] = \text{kg/m}^3$

Φ_m : Massendurchfluss $[\Phi_m] = \text{kg/s}$

Φ_v : Volumendurchfluss $[\Phi_v] = \text{m}^3/\text{s}$

Jeder digitale Durchflussregler besitzt einen integrierten Mikroprozessor und wird ab Werk auf das jeweils zu messende Gas mittels Polynomfunktion kalibriert, welche dann im Durchflussregler abgespeichert wird. Das Messsignal des Sensors wird nun somit mit optimaler Genauigkeit und Stabilität erfasst, wodurch ein schnelles Regelverhalten erreicht wird. Mit Hilfe der integrierten digitalen RS-485 Schnittstelle werden alle Durchflussregler über ein Bussystem (FLOW-BUS, Feldbus der Firma BRONKHORST) mit einem Auswertesystem verbunden, welches über eine RS-232 Schnittstelle mit zugehöriger Software ansteuerbar ist.

Das gesamte Konzept zur Gasdosierung ist in Abbildung 4-6 schematisch dargestellt. Die Durchflussraten und sonstigen Daten der eingesetzten Durchflussregler können im Anhang D auf CD-R nachgelesen werden.

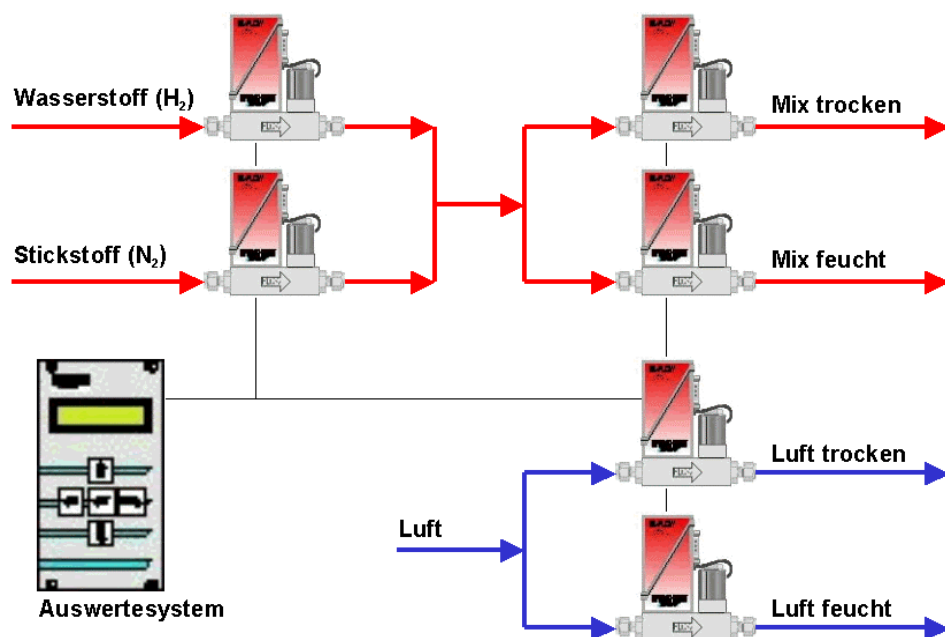


Abbildung 4-6: Schematische Darstellung der Gasdosierung

Wie in der Abbildung 4-6 zu erkennen, ist anodenseitig ein Wasserstoff-Stickstoff-Gemisch einstellbar, welches anschließend in einen „trockenen“ und einen „feuchten“ Gasstrom aufgetrennt wird. Kathodenseitig beschränkt sich die Gasdosierung auf die Volumenstromtrennung, da hier keine Gasmischung benötigt wird.

Da die Durchflussregler werksseitig durch die Mikroprozessortechnik auf jedes beliebige Gas, selbst auf Gasgemische, kalibriert werden können und dadurch Genauigkeiten von bis zu $\pm 0,5\%$ v. Messwert plus $\pm 0,1\%$ v. Endwert durch Kalibrierzertifikate bescheinigt werden (siehe Datenblätter im Anhang D auf CD-R), ist eine Überprüfung der Genauigkeit des eingestellten Volumenstromes bei der Inbetriebnahme nicht mehr notwendig.

Das benötigte Gas wird vorerst aus der Hausversorgung durch installierte Gashähne im Teststand entnommen. Später soll jeder Projektpartner Tests mit standardisierten Gasen aus Gasflaschen durchführen.

Um sowohl eine automatische als auch eine manuelle Sperrung der Gaszufuhr zu ermöglichen, befindet sich in jeder Gaszuleitung jeweils ein Magnetventil (24 VDC, 11 W) mit nachfolgendem Kugelhahn. Am Ausgang der Gasdosierung sind Rückschlagventile eingebaut, um die Durchflussregler zusätzlich vor ungewollten Druckrückschlägen im nachfolgenden Teil des Teststandes und dadurch möglichem Wassereintrag durch die Gasbefeuchtung (siehe Kap. 4.4) zu schützen.

4.4 Gasbefeuchtung

Der Feuchtegehalt der Prozessgase hat (wie in Kapitel 3 erläutert) einen entscheidenden Einfluss auf das Degradationsverhalten einer PEM-Brennstoffzelle. Da die zu testenden Brennstoffzellen bei einer Temperatur von bis zu maximal 130°C betrieben werden sollen, muss im kompletten Temperaturbereich, anoden- wie kathodenseitig, ein Feuchtegehalt von 0 bis 100% relativer Feuchte (rF) gewährleistet sein.

Wie schon in Kapitel 4.3 kurz beschrieben, basiert das Befeuchtungskonzept auf dem Trennen der Gasvolumenströme. Ein definierter Teil des Gesamtgasstromes („feuchter“ Gasstrom) wird auf 100%rF gebracht und mit dem „trockenen“ Gasstrom, der durch einen Bypass am Befeuchter vorbeigeleitet wird, gemischt. Geht man davon aus, dass das bereitgestellte Gas zuvor eine Feuchte von annähernd 0%rF besitzt, ist somit jeder gewünschte Feuchtegehalt einstellbar.

Die eigentliche Befeuchtung der Anoden- und Kathoden-Gasströme erfolgt in zwei baugleichen Gasbefeuchtern. Diese sogenannten Blasensäulen sind vereinfacht dargestellt rohrförmige Wasserbehälter, in die das Gas von unten eingeleitet wird. Das Gas kann zur Feinverteilung zusätzlich durch eine Dispersionsscheibe geleitet werden und steigt in kleinen Blasen auf, wobei Wasser in die Gasblase diffundiert.

Um dieses Konzept in die Praxis umzusetzen und die Behälter für die gewünschte Anwendung dimensionieren zu können, sind jedoch einige konstruktive Vorüberlegungen und thermodynamische Berechnungen notwendig. Bei den Berechnungen wurden stationäre Zustände betrachtet, d.h. konstante Aufstiegsgeschwindigkeit der Gasblasen im Wasser und reine Diffusion. Auf die Berechnung der Strecke, die eine Gasblase aufsteigen muss, um 100% relative Feuchte zu erlangen, wurde verzichtet, da diese aus vorherigen institutsinternen Berechnungen schon bekannt war und auch mit wenigen Millimetern vernachlässigbar klein ist.

Damit eine homogene Blasenströmung im Innern des Befeuchterrohres erreicht wird, ist bei gegebener Gasflussgeschwindigkeit ein bestimmter Behälterdurchmesser nach Abbildung 4-7 einzuhalten.

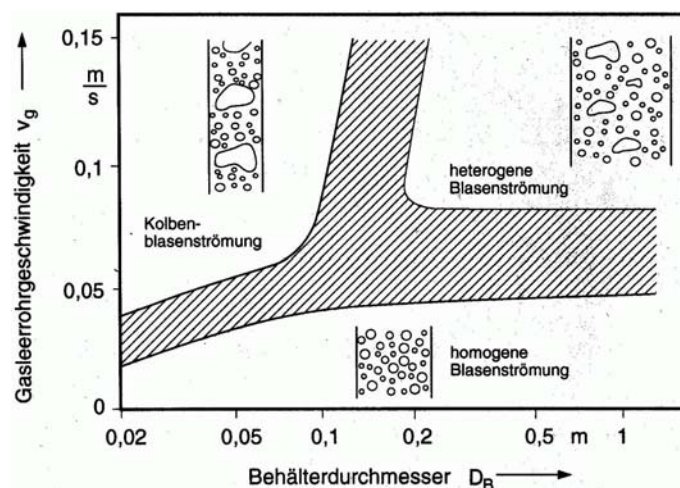


Abbildung 4-7: Strömungsbereiche in Blasensäulen [15]

Bei einem maximalen Volumenstrom von 2 l_n/min (Durchflussregler kathodenseitig) lässt sich die Durchflussgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Rohrrinnendurchmessers berechnen. Aus Abbildung 4-7 ergibt sich damit eine homogene Blasenströmung schon ab einem Behälterdurchmesser von 4 cm. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind dem Anhang B auf CD-R zu entnehmen.

Weiter ist nun das benötigte Wasservolumen des Behälters zu bestimmen. Gas kann bei verschiedenen Temperaturen nur eine gewisse Menge an Wasser aufnehmen. Bei einer relativen Feuchte von 100% spricht man von einer Sättigung des Gases. Die relative Luftfeuchte φ beschreibt das Verhältnis von Partialdampfdruck des Wassers p_D zum Sättigungsdampfdruck p_S bei der jeweiligen Temperatur [2]:

$$\varphi = \frac{p_D}{p_S} \quad (\text{Gl. 4.2})$$

$$[\varphi] = 1$$

$$[p_D], [p_S] = \text{Pa}$$

Um nun jedoch berechnen zu können, wieviel Wasser im gesättigten Gas enthalten ist, d. h. welche Menge Wasser ein Gas bei bestimmter Temperatur aufnimmt, muss die absolute Feuchte a bekannt sein [2]:

$$a = \frac{m_{H_2O}}{V} \quad [a] = \text{kg/m}^3 \quad (\text{Gl. 4.3}).$$

Mit Hilfe der Zustandsgleichung für ideale Gase [2]:

$$p_D \cdot V = \frac{m_{H_2O} \cdot R \cdot T}{M} \quad (\text{Gl. 4.4})$$

$$R: \text{universelle Gaskonstante} \quad [R] = 8,314 \text{ J/(K}\cdot\text{mol)}$$

$$M: \text{Molmasse} \quad [M] = \text{kg/mol}$$

und der Gleichung 4.2 für relative Feuchte ergibt sich daraus für die absolute Feuchte:

$$a = \frac{\varphi \cdot p_S \cdot M}{R \cdot T} \quad (\text{Gl. 4.5}).$$

Bei idealen Gasen ist die absolute Feuchte unabhängig vom Trägergas. Aus den Daten für den Sättigungsdampfdruck für Wasser bei unterschiedlichen Temperaturen [2] kann nun für jede beliebige Temperatur und relative Feuchte die absolute Feuchte berechnet werden. Als Maß für die Auslegung der Befeuchtereinheiten wurde eine Befeuchtung von 100%rF bei 80°C zugrunde gelegt. Bei einer Temperatur von 353,17 K besitzt Wasser einen Sättigungsdampfdruck von 0,4736 bar [2]. Mit einer Molmasse von 18,0153 g/mol für Wasser ergibt sich nun nach Gleichung 4.5 eine absolute Feuchte von $a = 0,291 \text{ kg/m}^3$. (Ergebnisse zu weiteren absoluten Feuchtwerten im Anhang B auf CD-R).

Mit diesem Ergebnis lässt sich nun der Massenstrom $\dot{m}$, d.h. wieviel Wasser pro Zeiteinheit in das Gas diffundiert, berechnen:

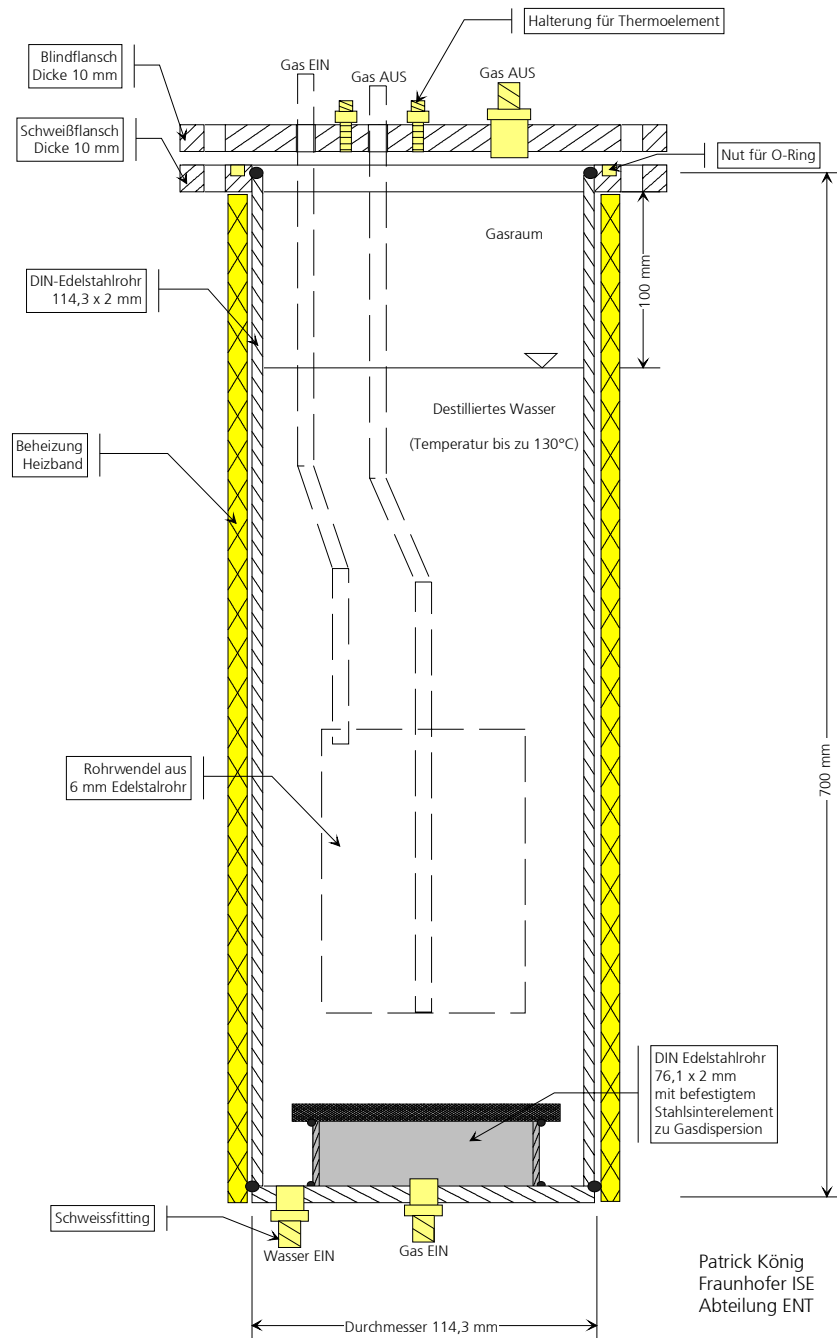
$$\dot{m} = \dot{V} \cdot a = 2 \frac{l_n}{\text{min}} \cdot 0,921 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\text{m}^3}{1000 l_n} \cdot \frac{l}{\text{kg}} \cdot \frac{60 \text{ min}}{h} = 0,03492 \frac{l}{h} \quad (\text{Gl. 4.6}).$$

Da es sich bei der Untersuchung der Degradation an Brennstoffzellen um Langzeitversuche handeln soll, ist es von Vorteil, wenn diese Versuche unbeaufsichtigt über längere Zeit laufen können. Darum wurde bei der Dimensionierung des Wasservolumens in den Befeuchtereinheiten auf eine mögliche Laufzeit von mehreren Tagen geachtet. Bei der Wahl des Rohrdurchmessers wurden gängige DIN-Maße betrachtet, um den Fertigungsaufwand möglichst gering zu halten.

So wurde für mehrere Rohrdurchmesser das Wasservolumen in Abhängigkeit von realisierbaren Rohrhöhen berechnet und mit dem Wasserverbrauch pro Zeiteinheit die theoretisch mögliche Versuchslaufzeit bei den zuvor genannten Rahmenbedingungen von 100%rF und 80°C ermittelt. Gewählt wurde ein Rohrrinnendurchmesser von 11,03 cm (nach DIN) bei einer Wasserhöhe von 60 cm, woraus sich ein Wasservolumen von 5,73 l ergibt. Bei einem Wasserverbrauch von maximal 80% des Gesamtvolumens ist nach Gleichung 4.6 eine theoretische Laufzeit von ca. 5,5 Tagen möglich. (Gesamte Ergebnisse hierzu im Anhang B auf CD-R).

Da das Befeuchterrohr nicht komplett mit Wasser gefüllt sein darf, um ein Mitreißen von Wassertropfen bei Austritt des Gasstromes zu verhindern, wurde eine Gesamtrohrlänge von 70 cm gewählt und so ein Gasraum im Rohr mit einer Höhe von 10 cm ermöglicht. Um eine Verunreinigung der Gase mit „Fremdionen“ aus dem Wasser zu vermeiden, ist der Einsatz von deionisiertem Wasser notwendig, was bei einer Betriebstemperatur von bis zu 130°C und durch den Einsatz von Wasserstoff spezielle Ansprüche an Materialauswahl und Konstruktion stellt. So wurden die Befeuchter komplett in Edelstahl (Werkstoff 1.4571) konzipiert, um der Korrosivität von Wasser und feuchten, heißen Gasen entgegenzuwirken.

In Abbildung 4-8 ist ein Schnitt durch einen Befeuchter dargestellt. Die gesamten technischen Zeichnungen sind dem Anhang D auf CD-R zu entnehmen.

Befeuchter O₂ (links)**Skizze****Abbildung 4-8: Schnittdarstellung eines Befeuchters**

Wie in der Abbildung 4-8 dargestellt ist, wurden DIN-Edelstahlrohre mit einem Außendurchmesser von 114,3 mm und einer Wandstärke von 2 mm verwendet. Als Bodenflansch dient eine 10 mm dicke Vollmaterialscheibe. Damit man bei einem längeren Testbetrieb Wasser mit einer Pumpe o.ä. nachfüllen kann, ohne den kompletten Befeuchter öffnen zu müssen, ist im Bodenflansch neben dem Rohranschluss für die Gaseinleitung auch ein Anschluss zur Wassernachfüllung angebracht.

Um eine Dispersionsscheibe zur Gasverteilung oberhalb des Gaseinlasses im Stahlbehälter befestigen zu können und zu vermeiden, dass Gas seitlich der Scheibe vorbeiströmt, musste eine geeignete Konstruktion gefunden werden. Die Firma TRIDELTA SIPERM[®] GmbH aus Dortmund stellte dazu freundlicherweise Musterronden aus 3 mm dickem, porösem Edelstahlsintermaterial zur Verfügung (Datenblätter siehe Anhang D auf CD-R). Diese normalerweise als Gasfilter eingesetzten Sinterscheiben aus rostfreiem Edelstahl mit einer Porosität von 200 µm und einem Durchmesser von 8 cm wurden auf ein Stück Edelstahlrohr geschweißt, was wiederum gasdicht mit dem Bodenflansch verschweißt wurde. In Abbildung 4-9 ist der Bodenflansch mit Dispersionseinheit dargestellt.



Abbildung 4-9: Bodenflansch mit angeschweißter Sinterscheibe

Das obere Ende der Befeuchter ist als Flansch ausgeführt und wird mit einem 10 mm dicken Blindflansch, sechs M8-Schrauben und einer O-Ring-Dichtung druckdicht verschlossen (vgl. Abb. 4-8). Weiter sind an den Blindflansch zwei Anschlüsse zur Befestigung von Thermoelementen angebracht, die die Temperatur des Wassers und des Gasraumes messen sollen. Als Gasauslass dient eine an den Blindflansch angeschweißte Rohrverschraubung.

Der durch die Gasdosierung eingestellte Gasstrom, der zu 100% befeuchtet werden soll, wird von unten in das Wasser des Befeuchters eingeleitet. Um nun sicherzustellen, dass der zur Einstellung des gewünschten prozentualen Feuchtegehaltes notwendige trockene Gasstrom (siehe Kap. 4.3) die gleiche Temperatur besitzt wie der befeuchtete Gasstrom, wird dieser durch eine Rohrwendel geleitet, die als Bypass in den Blindflansch eingesetzt ist und in das Wasser des Befeuchters ragt (vgl. Abb. 4-10).

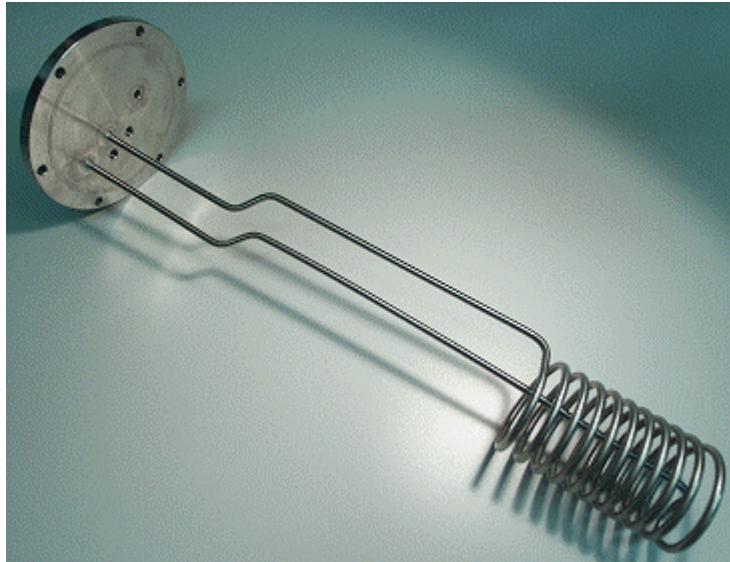


Abbildung 4-10: Blindflansch mit Rohrwendel

Der Auslass für das befeuchtete Gas und der Ausgang der Rohrwendel des trockenen Gasstromes werden oberhalb des Blindflansches durch Rohrverbindungen zusammengeführt und die beiden Gasströme so vermischt.

Um nun die gewünschte Betriebstemperatur einstellen zu können, ist jeder Befeuchter mit einem 10 m langen Silikon-isolierten, wasserfesten und flexiblen Heizband umwickelt. Diese Heizbänder besitzen eine Leistung von jeweils 1000 W und erreichen eine maximale Heiztemperatur von 200°C.

Direkt im Anschluss an die Zusammenführung des feuchten und trockenen Gasstromes sind den Befeuchtern Heizschläuche (Länge 1 m) mit einer Heiztemperatur von ebenfalls bis zu 200°C nachgeschaltet, die sicherstellen, dass der Gasstrom die im Befeuchter eingestellte Temperatur behält und kein Wasser auf dem Weg zu den Brennstoffzellen auskondensiert.

In Abbildung 4-11 sind die Befeuchter mit Heizband, Thermoelementen und angeschlossenen Heizschläuchen dargestellt.

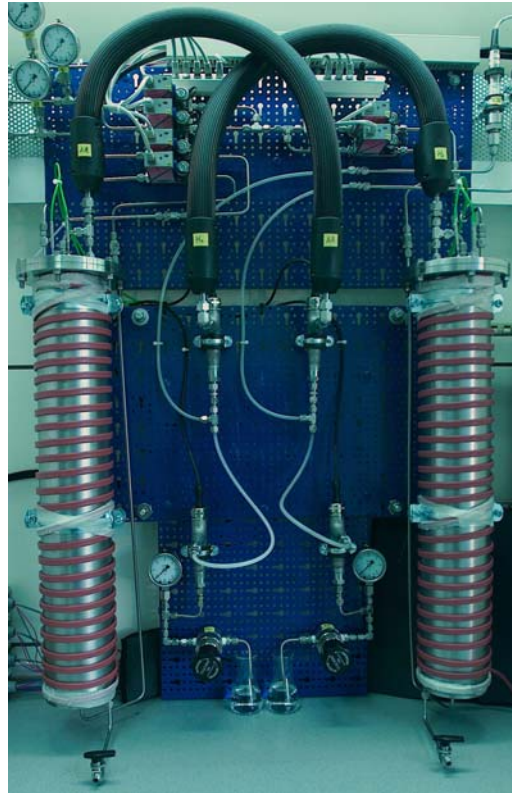


Abbildung 4-11: Befeuchter mit Heizband, Thermoelementen und Heizschläuchen

Nach erfolgter Fertigstellung und Einbau in den Teststand wurden die Befeuchter komplett mit aluminiumbeschichteter Steinwollematte KLIMAROCK der Firma ROCKWOOL[®] isoliert.

4.5 Feuchtemessung

Damit nun Aussagen über den internen Wasserhaushalt und dessen Einfluss auf die Degradation der Brennstoffzellen gemacht werden können, ist eine Feuchtemessung am Ein- und Ausgang der Zellen von Vorteil. Ferner gibt die Kenntnis der anodenseitigen Feuchtegehalte Aufschluss über Wassertransporteffekte durch die Membran. Mit der eingangsseitigen Feuchtemessung wird zudem die korrekte Funktion der Befeuchter überprüft.

Durch den relativ kleinen Rohrrinnendurchmesser der Gasleitungen von 4 mm wurden Feuchtesensoren mit möglichst geringen Abmessungen benötigt, um Temperatur- und Strömungsverluste gering zu halten. Dies gestaltete sich aber durch die gewünschte hohe Gastemperatur im Teststand von bis zu 130°C als äußerst schwierig, da auf dem Markt nur Standard-Miniatursensoren mit einem Einsatzbereich von bis zu 100°C zur Verfügung stehen.

Die schweizer Firma ROTRONIC bietet passive Fühler, d.h. ohne integrierte Elektronik an, die mit einem Temperatureinsatzbereich von -50 bis $+150^{\circ}\text{C}$, einer Länge von 10 cm und einem Durchmesser von 15 mm als guter Kompromiss angesehen werden können (vgl. Abb. 4-12).



Abbildung 4-12: Feuchtefühler ROTRONIC HYGROMER® I-1000

Diese temperaturkompensierten Feuchtefühler mit angeschlossenem Messumformer besitzen einen integrierten Pt100-Sensor zur gleichzeitigen Temperaturmessung und bestimmen die relative Feuchte im Bereich von 0 bis 100%rF mit einer Genauigkeit von $\pm 1,5\%$ rF (Datenblatt siehe Anhang D auf CD-R).

Der HYGROMER®-Feuchtesensor selbst arbeitet nach dem Prinzip der kapazitiven Feuchtemessung, welches auf der Änderung der dielektrischen Eigenschaften eines polymeren Kunststoffes in Abhängigkeit der herrschenden relativen Feuchtigkeit basiert. Das für den HYGROMER®-Sensor verwendete Polymer ist hygroskopisch und hat das natürliche Bestreben, sich mit seiner Umgebung ins Gleichgewicht zu bringen. In Abhängigkeit von der Temperatur und der im Polymer gespeicherten Wassermenge bildet sich ein entsprechender Wasserdampfdruck an der Oberfläche des Polymers. Jede Differenz zwischen diesem Wasserdampfdruck und dem Wasserdampfdruck der Umgebung wird durch den Austausch von Wasser so lange ausgeglichen, bis die beiden Druckwerte gleich sind [18]. Die sich im Polymer einlagernde Wassermenge verändert nun die dielektrischen Eigenschaften des Polymers. Diese Änderungen werden elektrisch gemessen und im Messumformer verstärkt. Das Feuchtesignal und das durch den Pt100-Sensor erfasste Temperatursignal wird jeweils als analoges Ausgangssignal ausgegeben, welches je nach Fühlertyp variiert. Gewählt wurde ein Spannungssignal von 0 bis 10 V bei 0 bis 100%rF und 0 bis 150°C .

Um nun die Feuchtefühler anoden- wie kathodenseitig vor und nach den Zellen einbauen zu können, wurden vier Feuchtemesskammern aus Edelstahl konstruiert (vgl. Abb. 4-13).



Abbildung 4-13: Feuchtemesskammer

Dabei erforderten die Ausmaße der Feuchtefühler eine spezielle Konstruktion, um den Gasstrom ohne allzu große Hindernisse an den Feuchtesensoren vorbeiführen zu können. Gleichzeitig durfte jedoch die Messkammer selbst nicht zu groß werden, um den Isolierungsaufwand möglichst gering zu halten und den Gasweg zu den Brennstoffzellen nicht zu lang werden zu lassen.

Nach Rücksprache mit der Firma ROTRONIC konnte eine geeignete Dimensionierung gefunden werden. Die Feuchtemesskammern bestehen nun jeweils aus einem T-Stück, konischen Rohrstücken und Swagelok®-Schweißfittingen zum Anschluss an die Rohrleitungen (technische Zeichnung im Anhang D auf CD-R). Der Feuchtefühler wird dabei druckdicht vertikal von oben eingeschraubt. Die konische Anordnung der Edelstahlrohrteile ermöglicht zudem einen nahezu verwirbelungsfreien Gasfluss.

Nach Einbau in den Teststand wurden die Messkammern mit einer 20 mm dicken Isolierung des Typs Armacell HT/Armaflex® ummantelt. Ebenso wurde die übrige Verrohrung mit einer 13 mm dicken Schlauchisolierung des gleichen Typs versehen.

4.6 Temperaturmessung

Um den Einfluss der Temperatur auf die Degradation zu untersuchen, ist eine definierte Beheizung der Gase erforderlich. Dafür sind Temperaturmessungen an möglichst vielen Stellen nötig. Neben den Feuchtesensoren, die schon integrierte Pt100-Sensoren besitzen und den Brennstoffzellen selbst, zu denen vom ZSW zwei Pt100-Elemente zur Zelltemperaturerfassung mitgeliefert wurden, werden ausschließlich Thermoelemente Typ K (NiCr-Ni) eingesetzt.

Diese im Gegensatz zu Pt100-Sensoren relativ günstigen und robusten Thermoelemente werden allgemein in der Abteilung im FhG ISE eingesetzt, wodurch auf gute Erfahrungswerte und Firmenkontakte zurückgegriffen werden konnte. So bietet die Firma RÖSSEL MESSTECHNIK Mantel-Thermoelemente in unterschiedlichen Längen und Durchmessern an, wodurch eine optimale Anpassung an die jeweiligen Erfordernisse möglich war.

Um den Vorteil der sehr genauen Pt100-Elemente etwas auszugleichen, wurden Thermoelemente mit einer Grenزابweichung nach DIN IEC 584 Klasse 1 gewählt. Diese besitzen eine Genauigkeit von $\pm 1,5$ K oder 0,4% des Messwertes (der jeweils größere Wert gilt) bei einem Messbereich von -40°C bis $+1000^{\circ}\text{C}$ (Datenblatt im Anhang D auf CD-R).

Pt100-Sensoren messen die Temperatur nach dem Prinzip der Temperaturabhängigkeit eines Platinwiderstandes. Zur exakten Messung ist dabei eine Messbrücke integriert, die jedoch durch die notwendige 4-Punkt-Messmethode vier Anschlüsse zur Messsignalerfassung benötigt. Im Gegensatz dazu messen Thermoelemente die Temperatur, indem bei Temperatureinfluss an der Verbindung eines Paares ungleicher Metalldrähte (hier NiCr-Ni) eine Spannung im Millivoltbereich auftritt. So benötigen Thermoelemente zur Messsignalerfassung nur zwei Anschlüsse. Dies ist hier bei der Vielzahl an Messstellen und bei der begrenzten Anzahl an Messkanälen des Datenerfassungssystems (siehe Kap. 5.2) von Vorteil.

In Abbildung 4-14 ist ein Mantelthermoelement mit einer Länge von 10 cm, einem Durchmesser von 1,5 mm und 2 m Ausgleichsleitung dargestellt.



Abbildung 4-14: Mantel-Thermoelement mit Ausgleichsleitung

4.7 Druckmessung

Um den Druck im gesamten Teststand aufrecht zu erhalten, sind am Systemausgang, d.h. nach den Feuchtemesskammern am Zellausgang manuelle Druckminderer, sogenannte Backpressure-Ventile angebracht, die sich bei Überschreiten des eingestellten Druckes öffnen und das überschüssige Gas abblasen.

Die eigentliche Messung und Anzeige des Systemdruckes wird einerseits in den Gaszuleitungen nach den Kugelhähnen und andererseits vor den Backpressure-Ventilen durch insgesamt fünf Manometer übernommen. Diese Manometer aus Edelstahl mit der Genauigkeitsklasse 1,6 haben einen Messbereich von 0 bis 6 bar(rel).

Zur Bestimmung des Druckabfalls in den Brennstoffzellen durch etwaige Wassereinlagerung o.ä. wird im Anoden- und Kathodengasstrom vor Eintritt in die Zellen der Druck über einen Rohrabzweig mittels zweier analoger Drucksensoren der Firma KELLER AG gemessen (vgl. Abb. 4-15).



Abbildung 4-15: KELLER Drucksensor Serie 33

Diese piezoresistiven Drucksensoren in 2-Leiter-Ausführung und einem analogen Stromausgangssignal von 4 bis 20 mA besitzen eine Gesamtgenauigkeit von besser als $\pm 0,1\%$ bei einem Messbereich von 0 bis 10 bar(abs). Das eigentliche Messelement ist eine schwimmend eingebaute Siliziummesszelle mit aufgebrachtem Temperaturnaufnehmer. Ein Mikroprozessor mit integriertem 13..14 Bit A/D-Wandler und 5-fach Multiplexer für die Signaleingänge sorgt mittels einer polynomischen Fehlerkorrektur für eine hochgenaue digitale Kompensation im Betriebstemperaturbereich von -10 bis $+80^{\circ}\text{C}$ (Datenblatt im Anhang D auf CD-R).

Auf die genaue Bestimmung des Differenzdruckes zwischen Ein- und Ausgang der Brennstoffzellen durch den Einsatz von zwei weiteren Drucksensoren am Ausgang der Zellen musste aus Kostengründen und dem Fehlen von zwei weiteren analogen Stromeingängen im Messwerterfassungssystem verzichtet werden. Der Druckabfall entlang

den Zellen wird somit vorerst aus der Differenz der genauen Druckwerte der Sensoren und der möglichst genau abgelesenen Druckwerte der Manometer ermittelt.

4.8 Elektronische Last

Anhand des Spannungs- bzw. Stromverlaufs der Brennstoffzellen bei Belastung über längere Zeit, lassen sich Aussagen über die Langzeitstabilität treffen und Alterungserscheinungen sichtbar machen. Zusätzlich ist eine elektrische Charakterisierung der Test-Brennstoffzellen mit Hilfe von Strom-Spannungs-Kennlinien notwendig.

Um nun sowohl U/I-Kennlinien aufnehmen zu können, als auch Spannungs- und Stromverläufe über der Zeit zu messen, wird eine elektronische Last 7141-Z der Firma INDUSTRIE TEAM SERVICE (ITS) GmbH eingesetzt, die über eine RS-232 Schnittstelle mit dem Messplatzrechner des Teststandes verbunden werden kann. Die elektronische Last nimmt die von der Brennstoffzelle zugeführte Leistung auf und gibt sie über Leistungstransistoren und hocheffektive Kühlelemente als Wärme an die Umgebung ab.

Beim Test von Quellen mit kleinen Ausgangsspannungen ($< 3\text{ V}$) und hoher Stromergiebigkeit wie im Fall der Brennstoffzelle gestaltet sich die Lastsimulation mit einer herkömmlichen elektronischen Last als äußerst schwierig. Die im Lastkreis eingesetzten Power-MOS-FETs und die zur Stromgegenkopplung notwendigen Sourcewiderstände benötigen eine Mindestspannung, die sich je nach Laststufe im Bereich von 2 bis 5 V bewegt. Durch eine zusätzliche Spannungsquelle, die in Reihe zur prüfenden Quelle geschaltet wird, kann dies kompensiert werden. Präzise statische und dynamische Messungen am Prüfling sind in dieser Form jedoch nicht möglich, da in das Messergebnis die Reihenschaltung von Prüfling, Stützstromversorgung und Lastkreisverdrahtung eingeht [19]. Diese notwendige Stützspannung ist in der Last 7141-Z bereits integriert und ermöglicht so den Einsatz als sogenannte 0-Volt-Last, wodurch sich keine Einschränkungen bezüglich der Eingangsspannung ergeben.

Zur Erfüllung der unterschiedlichen Prüfaufgaben stellt die elektronische Last verschiedene Betriebsarten zur Verfügung. Im Konstantstrom-Modus (I-Mode) wird die zu prüfende Brennstoffzelle mit einem konstanten Strom belastet, welcher im Bereich der zulässigen Eingangsspannung völlig unabhängig vom Betrag der Eingangsspannung ist. Der Konstantspannungs-Modus (U-Mode) hält die Spannung an den Lastklemmen konstant, wobei der Prüfling gerade so stark belastet wird, bis sich die gewünschte Spannung einstellt. Die Aufnahme von Strom-Spannungs-Kennlinien ist grundsätzlich in

beiden Betriebsarten möglich und wird entsprechend dem Ziel der jeweiligen Messung gewählt.

Zum Ausgleich des Spannungsabfalls über den Lastleitungen dient ein sogenannter Sense-Anschluss mit Ausgleichsleitung.

Zusätzlich zu den beiden zuvor genannten Betriebsarten ist auch ein sogenannter G-Mode wählbar (0 bis 40 S), wobei sich ein konstanter Leitwert über mehr als drei Dekaden einstellen lässt.

Die elektronische Last 7141-Z ermöglicht wählbare Eingangsbereiche für Spannungen von 0 bis 4 V und 0 bis 40 V sowie für Ströme von 0 bis 10 A und 0 bis 40 A. Daraus ergibt sich eine Lastleistung von bis zu 400 W. In allen Bereichen wird eine Genauigkeit von 0,1% v. E. erreicht, bei einer Auflösung von 0,05% v. E.. (Datenblatt im Anhang D auf CD-R).

Die Steuerung und Anzeige der Messwerte (Spannung, Strom und Leistung) erfolgt intern über ein LC-Display und Eingabetastatur oder extern über eine digitale RS-232, bzw. eine analoge Schnittstelle.

4.9 Stromversorgung

Die gesamte Stromversorgung des Teststandes erfolgt über in den Laborabzug integrierte Schutzkontaktsteckdosen, welche mit einem 16A-Sicherungsautomat (ABB S261-B16A) und einem FI-Schutzschalter (ABB FS374-40A/0,03, 4pol) abgesichert sind.

An eine der vier in den Abzug integrierten Steckdosen ist eine schaltbare Mehrfach-Schutzkontaktsteckdosenleiste angeschlossen. Hier sind die elektronische Last, das BRONKHORST-Auswertegerät für die Durchflussregler, ein 24 VDC-Netzteil und eine 230V-Zuleitung (H05VV-F3 x 1,5mm²) angeschlossen. Über den Schalter der Steckdosenleiste ist es somit möglich, den gesamten Teststand spannungsfrei zu schalten.

Zum Anschluss der Systemkomponenten an die Stromversorgung wurde in den Teststand ein Kunststoff-Klemmenkasten eingebaut, in dem auf drei Hutschienen die Verdrahtung mittels Reihenklemmen vorgenommen wurde (vgl. Abb. 4-16).

Zur Temperaturregelung der Befeuchter-Heizbänder, der Heizschläuche und der Heizelemente der Brennstoffzellen, sowie zur Steuerung der Magnetventile werden insgesamt sieben Leistungsrelais (5A, 2 x UM, Standardtyp G2R-2) eingesetzt, die mittels Steckfassungen auf der oberen Hutschiene angebracht sind. Da die drei Magnetventile der Gasversorgung parallel verschaltet sind, werden diese über ein gemeinsames Relais angesteuert.

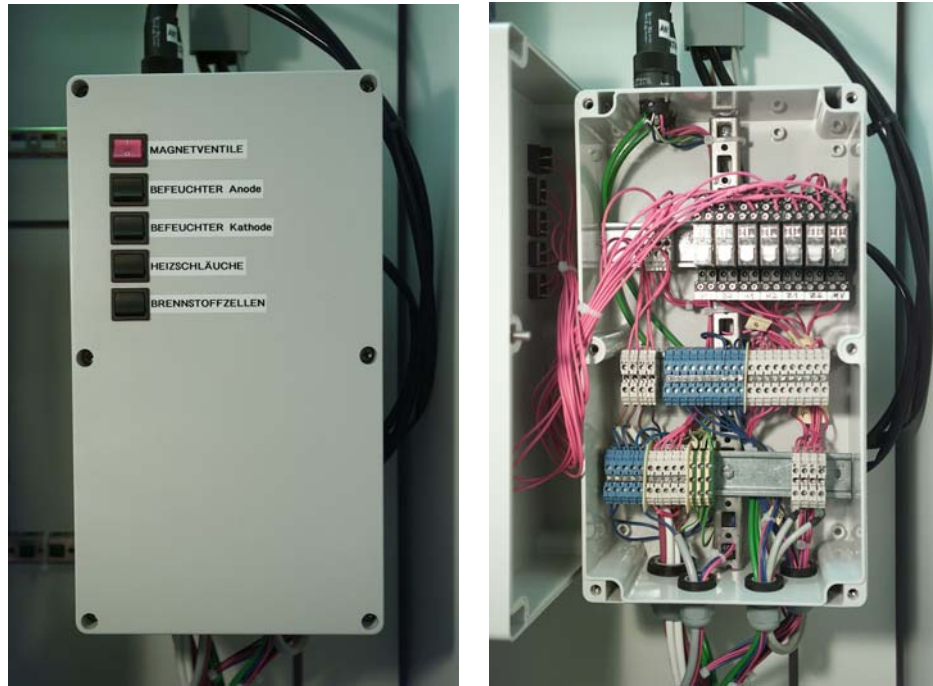


Abbildung 4-16: Klemmenkasten Frontansicht und Verdrahtung

Um zusätzlich eine manuelle Sicherheitsabschaltung der 230 VAC-Verbraucher und der Magnetventile (24 VDC) zu ermöglichen, sind die Versorgungsstromkreise der Leistungsrelais über Miniatur-Wippenschalter (MARQUARDT, 2-polig, 250 VAC/6(4)A) geführt, die frontseitig am Klemmenkasten angebracht sind. Dabei sind nur die beiden Heizbänder der Befeuchter aufgrund ihrer Stromaufnahme von jeweils ca. 4,5 A über zwei separate Wippenschalter geführt. Die Magnetventile, Heizschläuche und Heizelemente sind jeweils gemeinsam schaltbar.

Zur Versorgung der Gleichstromverbraucher wie Steuerstromkreise der Leistungsrelais, Magnetventile, Drucksensoren und Messumformer der Feuchtesensoren dient ein primärgetaktetes Schaltnetzteil SMPS 2410 (CONRAD) mit einer Ausgangsspannung von 24 VDC $\pm 0,5$ V und 8 A (kurzzeitig 10 A) Ausgangsstrom, welches an einen Block Reihenklemmen an der mittleren Hutschiene des Klemmenkastens angeschlossen ist.

Auf der unteren Hutschiene befindet sich ein weiterer Block mit Reihenklemmen, der durch die angeschlossene 230 VAC-Zuleitung die Wechselstromversorgung und Erdung der jeweiligen Systemkomponenten übernimmt.

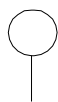
Zur besseren Übersicht ist im Anhang A auf CD-R ein vereinfachter Stromlaufplan des Teststandes einzusehen.

5 Automatisierung des Teststandes

Aufgabe der Teststandautomatisierung ist es, alle Messgrößen der in Kapitel 4 beschriebenen Systemkomponenten zu erfassen und daraus mit Hilfe geeigneter Algorithmen die notwendigen Werte der Steuer- und Regelgrößen zu ermitteln.

5.1 Mess-, Steuer- und Regelstellen

Die in den Teststand zur Visualisierung, Überwachung und Datenerfassung integrierten Mess-, Steuer- und Regelstellen sowie Systemkomponenten sind dem Verfahrensfließbild in Abbildung 5-1 zu entnehmen, wobei aus Gründen der Übersichtlichkeit auf die Darstellung der Messgrößen der elektronischen Last verzichtet wurde. Die Kennzeichnung der Messstellen wurde dabei nach DIN 19227 ausgeführt. Die darin verwendeten Symbole werden wie folgt unterschieden:



Messstelle vor Ort



Messstelle zur Warte

(von der Automatisierungssoftware erfasst)

In der folgenden Tabelle 5-1 sind die verwendeten Kennbuchstaben nach DIN 19227 aufgelistet.

Kennbuchstabe	Gruppe 1: Messgröße oder andere Eingangsgröße		Gruppe 2: Verarbeitung
	als Erstbuchstabe	als Ergänzungsbuchstabe	als Folgebuchstabe
C			Selbsttätige Regelung, Selbsttätige fortlaufende Steuerung
F	Durchfluss, Durchsatz	Verhältnis	
I			Anzeige
P	Druck		
T	Temperatur		Messumformerfunktion
X	Sonstige Größen (hier: relative Feuchte)		Sonstige (Vereinbarungs-) Funktionen

Tabelle 5-1: Verwendete Kennbuchstaben zur Benennung der MSR-Stellen

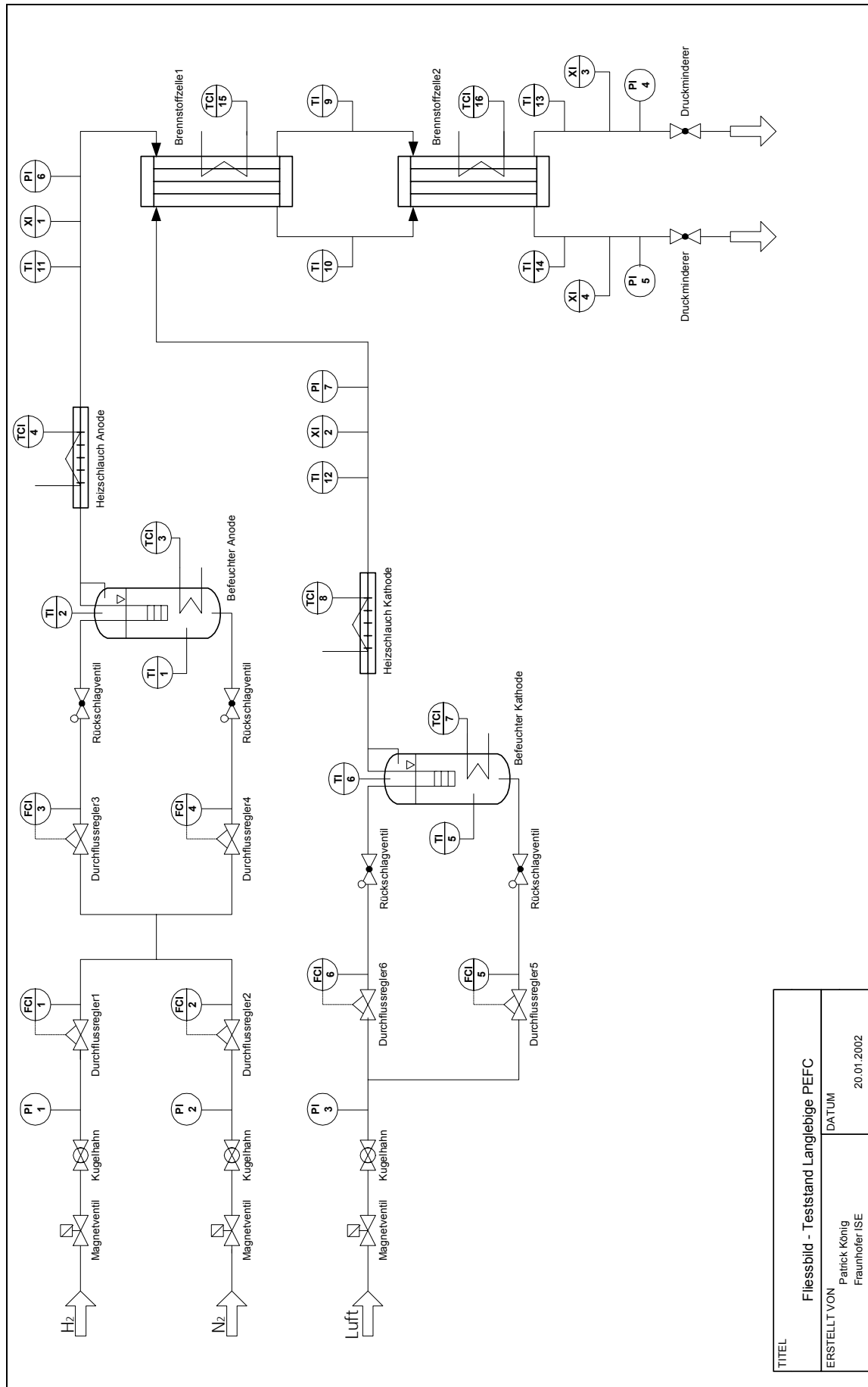


Abbildung 5-1: Verfahrensfließbild des Teststandes

Nachfolgend sind die im Fließbild dargestellten Messstellen entsprechend ihrer Funktion gegliedert. Die Auflistung nach Tabelle 5-2 beinhaltet dabei das Kurzzeichen, die Art des Bauteils und dessen Funktion:

Kurzzeichen	Bauteil	Funktion
FCI1	Durchflussregler	Volumenstrom H ₂
FCI2	Durchflussregler	Volumenstrom N ₂
FCI3	Durchflussregler	Volumenstrom MIX trocken
FCI4	Durchflussregler	Volumenstrom MIX feucht
FCI5	Durchflussregler	Volumenstrom LUFT feucht
FCI6	Durchflussregler	Volumenstrom LUFT trocken
PI1	Manometer	Druck H ₂ Eingang
PI2	Manometer	Druck N ₂ Eingang
PI3	Manometer	Druck LUFT Eingang
PI4	Manometer	Systemdruck ANODE
PI5	Manometer	Systemdruck KATHODE
PI6	Drucksensor	Druck ANODE Eingang
PI7	Drucksensor	Druck KATHODE Eingang
TI1	Thermoelement	Wassertemperatur Befeuchter ANODE
TI2	Thermoelement	Gastemperatur Befeuchter ANODE
TCI3	Thermoelement	Heizelement Befeuchter ANODE
TCI4	Thermoelement	Heizschlauch ANODE
TI5	Thermoelement	Wassertemperatur Befeuchter KATHODE
TI6	Thermoelement	Gastemperatur Befeuchter KATHODE
TCI7	Thermoelement	Heizelement Befeuchter KATHODE
TCI8	Thermoelement	Heizschlauch KATHODE
TI9	Thermoelement	Gastemperatur Zelle1/Zelle2 ANODE
TI10	Thermoelement	Gastemperatur Zelle1/Zelle2 KATHODE
TI11	Pt100 (Feuchtesensor)	Gastemperatur ANODE Eingang
TI12	Pt100 (Feuchtesensor)	Gastemperatur KATHODE Eingang
TI13	Pt100 (Feuchtesensor)	Gastemperatur ANODE Ausgang
TI14	Pt100 (Feuchtesensor)	Gastemperatur KATHODE Ausgang
TCI15	Pt100	Temperatur Zelle1 (Referenz-Zelle)
TCI16	Pt100	Temperatur Zelle2
XI1	Feuchtesensor	Relative Feuchte ANODE Eingang
XI2	Feuchtesensor	Relative Feuchte KATHODE Eingang
XI3	Feuchtesensor	Relative Feuchte ANODE Ausgang
XI4	Feuchtesensor	Relative Feuchte KATHODE Ausgang

Tabelle 5-2: Übersicht der MSR-Stellen im Verfahrensfliessbild

Wie dem Verfahrensfließbild (vgl. Abb. 5-1) zu entnehmen ist, werden insgesamt 16 Temperaturen gemessen. Dabei werden die Temperaturen TI1 bis TI10 mittels einzelner Thermoelemente erfasst, wobei die Temperaturen der Heizschläuche (TCI4 und TCI8) durch firmenseitig integrierte Thermoelemente gemessen werden. Die Erfassung der Temperaturen TI11 bis TI14 erfolgt durch die in die Feuchtesensoren integrierten Pt100-Elemente und den jeweils angeschlossenen Messumformern (vgl. Kap. 4.5).

Die Temperaturen TCI15 und TCI16 der beiden Test-Brennstoffzellen werden direkt durch Pt100-Sensoren gemessen, die vom ZSW in die Zellen eingepasst wurden.

5.2 Hardware zur Datenerfassung

5.2.1 Datenlogger

Neben den Messsignalen der Durchflussregler und der elektronischen Last, die schon digital gewandelt ausgegeben werden und direkt in den PC eingelesen werden können, müssen die unterschiedlichen analogen Signale der Temperatur-, Feuchte- und Druckmessung mit Hilfe eines Datenerfassungssystems zuerst digital gewandelt werden. Zusätzlich ist für die Temperaturregelung der Befeuchter, Heizschläuche und Brennstoffzellen, sowie zur Steuerung der Magnetventile, d.h. für die gesamte Ansteuerung der Schaltrelais (vgl. Kap. 4.9) eine Steuereinheit notwendig.

Zur Umsetzung dieser Anforderungen wird ein Datenerfassungssystem/Digitalmultimeter vom Typ DMM 2700 der KEITHLEY Instruments GmbH verwendet. Das Modell 2700 ist ein Mehrpunkt-Mess- und Steuerungssystem mit zwei Modulsteckplätzen für Anwendungen mit bis zu 80 Kanälen. Durch die Wahl von verschiedenen Schalt- und Steuermodulen lässt sich das System entsprechend der jeweiligen Anwendung konfigurieren.

Hier wird zum einen ein „7706 All-in-One I/O Modul“ verwendet, welches neben zwei analogen Ausgängen, Zählfunktion und Frequenzmesser 20 analoge Eingänge und 16 digitale Ausgänge besitzt. Die analogen Eingänge sind sowohl zur Spannungsmessung (ACV, DCV) als auch zur Temperaturmessung (Thermoelement, Thermistor, Widerstandstemperaturfühler) geeignet. Zum Anschluss von Thermoelementen ist zusätzlich ein isothermer Block mit Referenztemperaturmessung integriert, der eine externe Temperaturvergleichsstelle überflüssig macht.

Die 16 digitalen Ausgänge des Moduls 7706 sind in zwei Bytes (Kanal 221 und Kanal 222) zusammengefasst und können über verschiedene Bitmuster angesteuert werden.

Kanal 221 steuert somit über Bit0 bis Bit6 die einzelnen Leistungsrelais zur Temperaturregelung und Steuerung der Magnetventile (vgl. Kap. 4.9).

Da für die Drucksensoren zusätzlich zwei analoge Stromeingänge benötigt werden und die Pt100-Sensoren der Brennstoffzellen jeweils zwei Kanäle zur 4-Punkt-Messung belegen, wird als Zweitmodul eine „7700 Multiplexer“-Steckkarte verwendet. Diese besitzt neben 20 analogen Eingängen (vgl. Modul 7706) noch zwei Stromeingänge (ACA, DCA).

Die analogen Eingänge sind bei allen Modulen einzeln konfigurierbar, wodurch jedem Kanal ein beliebiges Eingangssignal zuordenbar ist. Der Anschluss der jeweiligen Sensoren erfolgt über Schraubklemmen auf dem Steckmodul.

Im Anhang A auf CD-R ist die gewählte Kanalbelegung der Module mit entsprechender Beschreibung und der erfassten Messgröße ersichtlich.

Der Datenlogger verfügt sowohl über eine serielle RS232-Schnittstelle als auch über einen GPIB-Anschluss (General Purpose Interface Bus) zur Kommunikation mit dem Messplatzrechner.

5.2.2 Messplatzrechner

Zur Messwertverarbeitung und Steuerung der einzelnen Systemkomponenten wird ein handelsüblicher PC (256 MB RAM, AMD Duron™) mit zwei seriellen Schnittstellen (COM1 und COM2) eingesetzt.

Über COM1 ist das BRONKHORST-Auswertegerät zur Steuerung der Durchflussregler mit einer Übertragungsrate von 38400 Baud angeschlossen. Die elektronische Last ITS 7141-Z wird mit einer Baudrate von 9600 über COM2 angesteuert.

Durch die Belegung der beiden seriellen Schnittstellen des Messplatzrechners muss der Anschluss des KEITHLEY Datenloggers über dessen GPIB-Schnittstelle realisiert werden. Der General Purpose Interface Bus (GPIB) ist ein Schnittstellensystem nach IEEE-488 Industriestandard, das mit einer Datenübertragungsgeschwindigkeit von 250 Kilobyte bis 1 Megabyte pro Sekunde programmierbare Geräte verbindet und steuert. Dabei ist es möglich, an nur einem Bus-System bis zu 15 programmierbare Geräte anzuschließen und zu steuern.

In den Messplatzrechner wurde darum eine GPIB Interface Karte (PCI-GPIB) von NATIONAL INSTRUMENTS™ eingebaut, die aufgrund ihrer optimalen Kompatibilität zu dem KEITHLEY Datenlogger und der Automatisierungssoftware LabVIEW™ (siehe Kap. 5.3) eine schnelle Anbindung an den PC ermöglichte.

5.3 Automatisierung mit LabVIEW™

Neben Konzeption und Aufbau des Teststandes war die vollständige Automatisierung mit Hilfe einer geeigneten Steuer- und Regelungssoftware ein weiterer Hauptpunkt der Diplomarbeit. Dabei sollte die Vielzahl der zuvor genannten Parameter und Messdaten aller Systemkomponenten erfasst und verarbeitet werden können, ohne an Übersichtlichkeit und Bedienerfreundlichkeit zu verlieren. Die Wahl fiel auf LabVIEW™ von NATIONAL INSTRUMENTS™, da diese Automatisierungssoftware eine schnelle Implementierung von verschiedenen Kontrollstrategien und Datenverarbeitungsprozessen erlaubt.

5.3.1 Beschreibung der Software

LabVIEW™ steht für **L**aboratory **V**irtual **I**nstrument **E**ngineering **W**orkbench. Im Gegensatz zu den gängigen textorientierten Programmiersprachen wie Pascal oder C erfolgt hier eine grafische Programmierung in der Programmiersprache G, wobei grafische Symbole anstelle von Textzeilen benutzt werden um Applikationen zu erstellen.

Da die LabVIEW™-Programme in ihrem grafischen Erscheinungsbild und ihrer Funktionsweise physikalischen Messgeräten gleichen, wird ein solches Programm auch virtuelles Instrument (VI) genannt. Die beiden Hauptbestandteile eines VIs sind das sogenannte Frontpanel und das Blockdiagramm. Das Frontpanel stellt die interaktive Benutzeroberfläche dar und enthält grafische Steuer- und Bedienelemente sowie Anzeigen. Das zugehörige Blockdiagramm enthält die eigentliche Programmierlogik und ist das ausführbare Programm. Es enthält den grafischen Quellcode mit elementaren Operatoren, vordefinierten Funktionen, Konstanten und Ablaufstrukturen. Ebenfalls können auch andere VIs als Unterprogramme (sogenannte subVIs) in das Blockdiagramm eingefügt werden. Frontpanel-Objekte haben korrespondierende Anschlüsse im Blockdiagramm, so dass Daten vom Benutzer an das Programm und umgekehrt übergeben werden können.

5.3.2 Hauptprogramm des Teststandes

Das VI „**Teststand-Langlebige-PEFC**“ stellt das Hauptprogramm der Teststandautomatisierung dar, welches die eigentlichen Benutzeroberflächen enthält und die verschiedenen subVIs zur Datenerfassung, Datensicherung, Regelung und Steuerung kontrolliert.

Nachfolgend werden die vier Hauptbildschirme (Frontpanels) des Programms erklärt, welche dem Benutzer die gesamte Kontrolle und Steuerung des Teststandes ermöglichen. Anschließend soll kurz auf das Blockdiagramm eingegangen werden, wobei zur besseren Übersicht einzelne Programmteile und subVIs entsprechend ihrer Funktion und Aufgabe zusammengefasst werden. (Die komplette Programmierung ist im Anhang C auf CD-R zu finden).

Durch die eingestellte Vorkonfiguration des VIs „**Teststand-Langlebige-PEFC**“ geht das Hauptprogramm bei Aufruf gleich in den Run-Modus über und ist damit sofort betriebsbereit. Voraussetzung für eine störungsfreie Funktion und Kommunikation mit der Systemhardware ist allerdings, dass sowohl der Datenlogger als auch die Durchflussregler schon zuvor eingeschaltet wurden und der gesamte Teststand betriebsbereit ist.

Der Benutzer hat nun die Möglichkeit, über das zuerst erscheinende Frontpanel „**System Config-F4**“ (vgl. Abb. 5-2) diverse Systemeinstellungen vorzunehmen. Die drei übrigen Hauptbildschirme („Flussdiagramm-F1“, „Datendisplay-F2“, „Brennstoffzelle-F3“) sind über Mausklick oder die entsprechenden F-Tasten zugänglich. Zudem ist es jederzeit möglich, das Programm über die Tastenkombination **Ctrl+F12** zu beenden und somit eine softwaremäßige Sicherheitsabschaltung vorzunehmen.

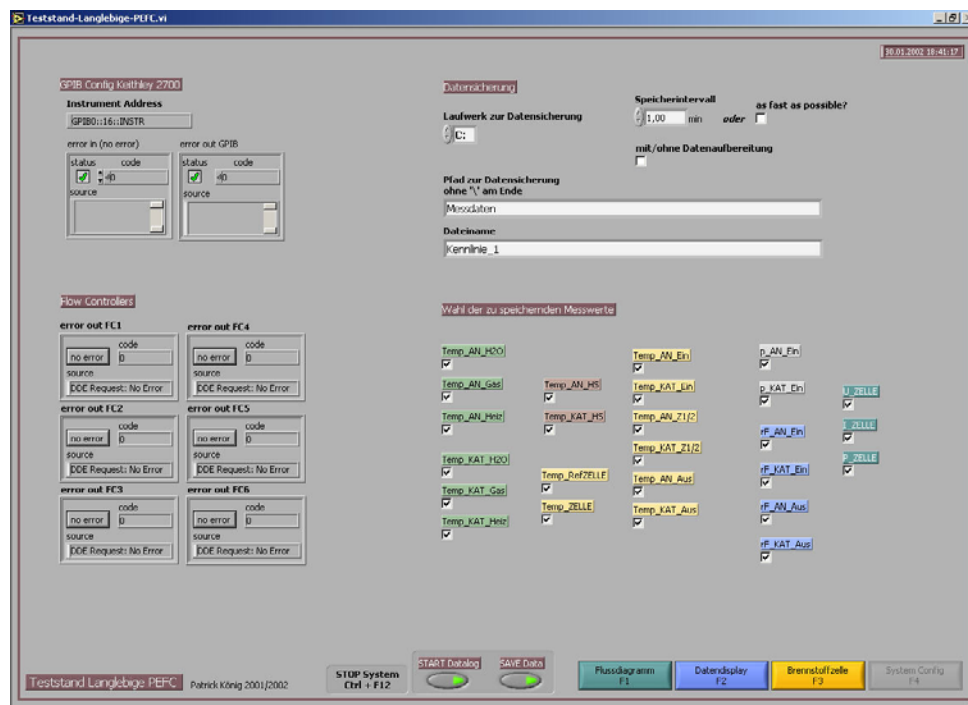


Abbildung 5-2: Hauptbildschirm "System Config-F4"

Neben den Statusanzeigen des KEITHLEY Datenloggers und der BRONKHORST Durchflussregler sind über den Hauptbildschirm „**System Config-F4**“ Einstellungen zur Messwerterfassung und Datensicherung möglich. Der Benutzer wählt Laufwerk, Pfad und Dateiname, sowie das Speicherintervall zur Abspeicherung der Messdaten. Bei der Wahl des Speicherintervalls besteht zudem die Möglichkeit der kontinuierlichen Speicherung („as fast as possible“) entsprechend der Abtastrate des Datenloggers oder der zeitabhängigen Speicherung (Angabe in Minuten). Wird zusätzlich zur zeitabhängigen Speicherung die Aufbereitung der Daten gewünscht, werden die Messwerte kontinuierlich erfasst und daraus bis zur endgültigen Abspeicherung (entsprechend dem gewählten Speicherintervall) Mittelwert, Minimum, Maximum und Standardabweichung ermittelt. Diese Werte werden dann zusätzlich zu dem aktuellen Messwert mit abgespeichert. Die oben erläuterten Funktionen werden auf jeden Messwert angewandt, der zuvor im Menü „**Wahl der zu speichernden Messwerte**“ angewählt wurde. Das Starten und Beenden der Datenspeicherung ist jederzeit über den Schalter „**SAVE Data**“, der über jeden Hauptbildschirm zugänglich ist, durch Mausklick möglich.

Zur eigentlichen Steuerung des Teststandes, d.h. zur Gasdosierung, Gasbefeuchtung und Temperierung dient der Hauptbildschirm „**Flussdiagramm-F1**“ (vgl. Abb. 5-3). Dieser ist dem Verfahrensfließbild des Teststandes nachempfunden und gibt durch die Anzeige jeder Mess-, Steuer- und Regelstelle Aufschluss über den aktuellen Systemzustand.

Neben der Steuerung der Magnetventile über den Schalter „**Magnetventile AUF/ZU**“, ist über den Hauptbildschirm „**Flussdiagramm-F1**“ die Einstellung der Gesamtvolumenströme für Wasserstoff und Luft möglich, wobei anodenseitig zusätzlich zum Wasserstoff der prozentuale Stickstoffanteil am Gesamtvolumenstrom wählbar ist. Anoden- wie kathodenseitig ist zudem die relative Feuchte einstellbar. Aus den Werten für die Gesamtdurchflüsse, dem prozentualen Stickstoffanteil und den relativen Feuchtwerten werden dann entsprechend der Volumenstromtrennung (siehe Kap. 4.3) automatisch die absoluten Werte zur Ansteuerung der jeweiligen Durchflussregler ermittelt und an diese übergeben.

Zur Temperierung der Befeuchter, Heizschläuche und Brennstoffzellen ist jeweils eine separate Temperaturwahl möglich. Die Überwachung der Temperaturwerte erfolgt dabei über die entsprechenden Thermoelemente und Pt100-Sensoren (vgl. Kap. 4.6).

Sobald ein Heizelement aktiv ist (Relais zur Temperaturregelung schaltet ein, siehe Kap. 4.9), wird dies durch eine entsprechende grafische Leuchtdiode auf dem Bildschirm

kenntlich gemacht. Zudem ist es sicherheitstechnisch möglich, jedes Heizelement über einen OFF-Schalter softwaremäßig von der Temperaturregelung zu trennen.

Die Regelung der Temperaturen auf die jeweils eingestellten Werte, sowie die Anzeige der gesamten Temperatur-, Feuchte- und Druckwerte des Teststandes erfolgt jedoch erst beim Starten der gesamten Datenerfassung des Datenloggers über den Schalter „**START Datalog**“, der über jeden Hauptbildschirm zugänglich ist.

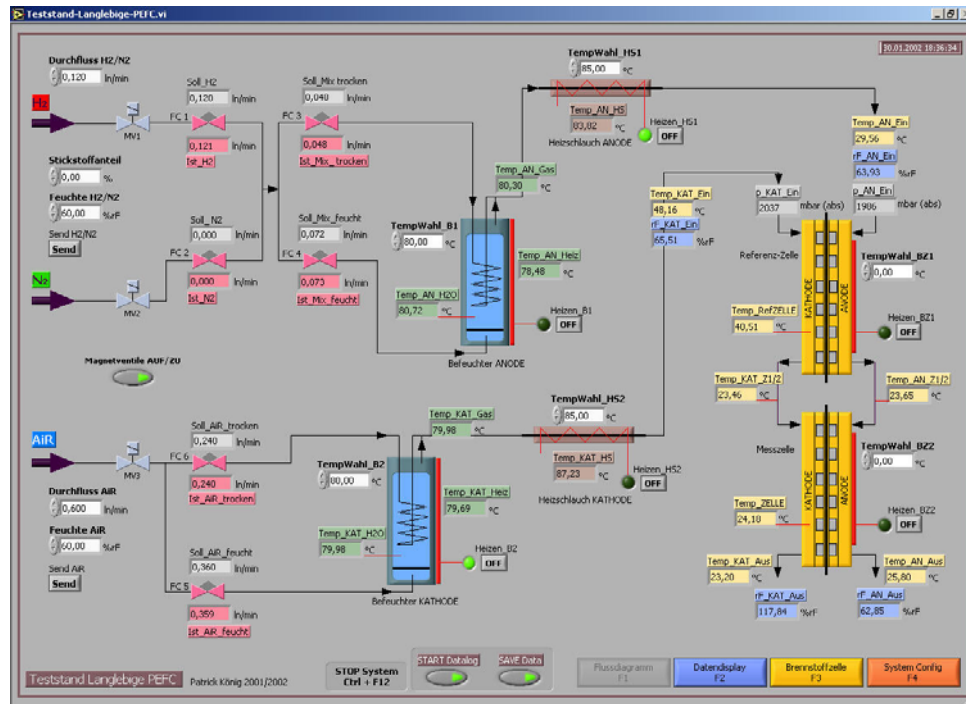


Abbildung 5-3: Hauptbildschirm "Flussdiagramm-F1"

Um den zeitlichen Verlauf der Temperatur-, Feuchte- und Druckwerte während der Messung verfolgen zu können, werden im Hauptbildschirm „**Datendisplay-F2**“ die durch den Datenlogger erfassten Messwerte in drei Diagrammen dargestellt (vgl. Abb. 5-4).

Die Zeitachsen der drei Graphen für die Temperatur-, Feuchte- und Druckwerte werden dabei mit der aktuellen Uhrzeit (Systemzeit) dargestellt und entsprechend dem Scanintervall des Datenloggers aktualisiert. Zusätzlich zum Kurvenverlauf werden alle Messwerte in Form einer digitalen Anzeige ausgegeben, um deren aktuellen und exakten Betrag ablesen zu können.

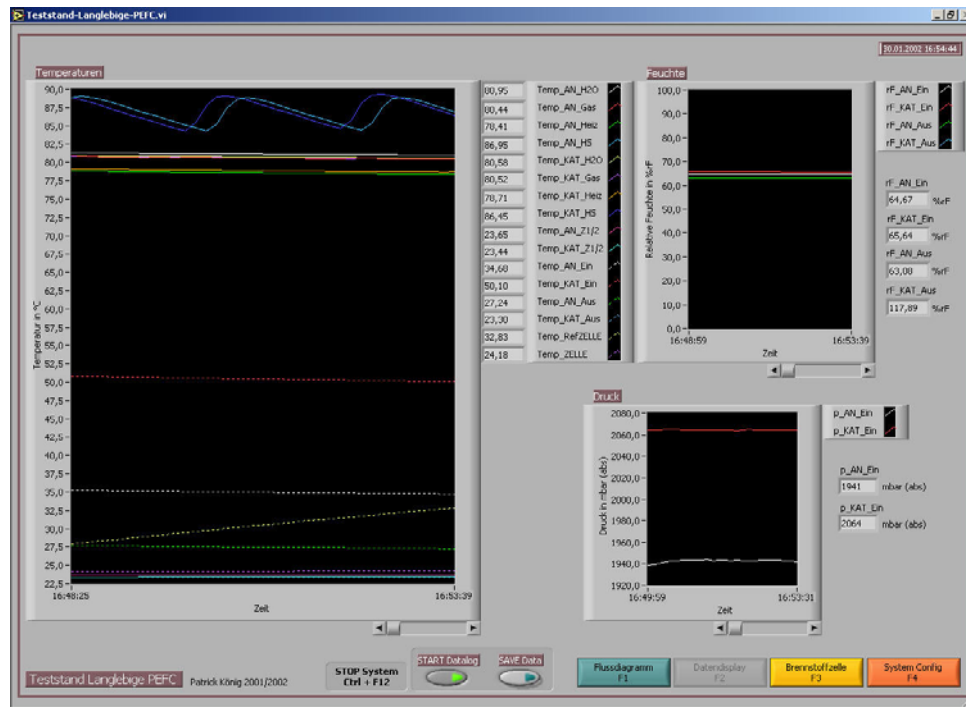


Abbildung 5-4: Hauptbildschirm "Datendisplay-F2"

Im Hauptbildschirm „**Brennstoffzelle-F3**“ (vgl. Abb. 5-5) wird Spannung, Strom und Leistung der an die Last angeschlossenen Brennstoffzelle dargestellt.

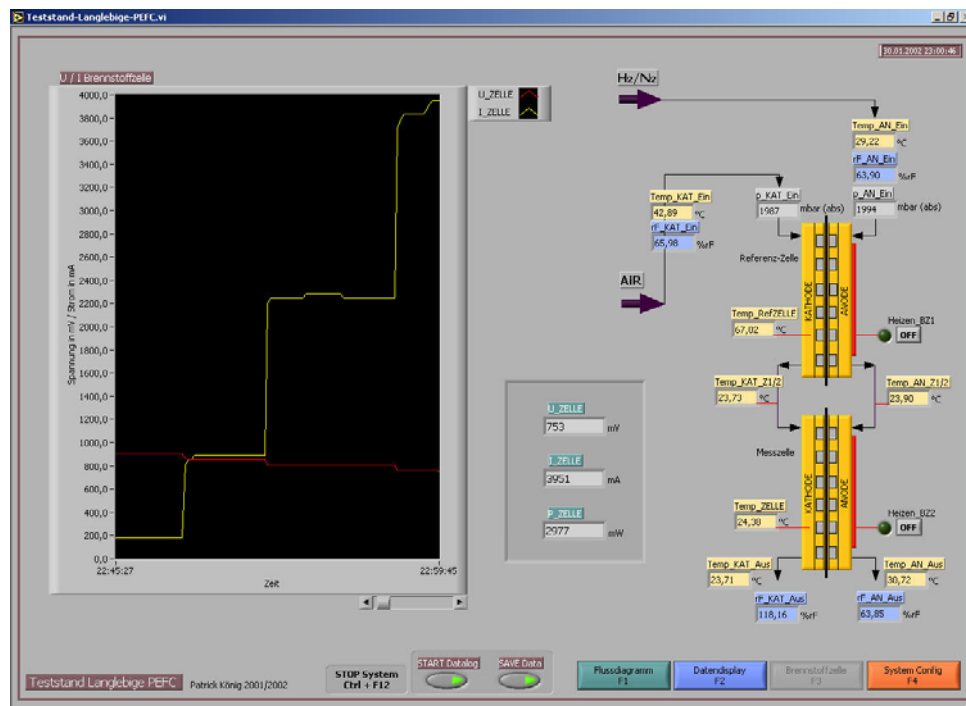
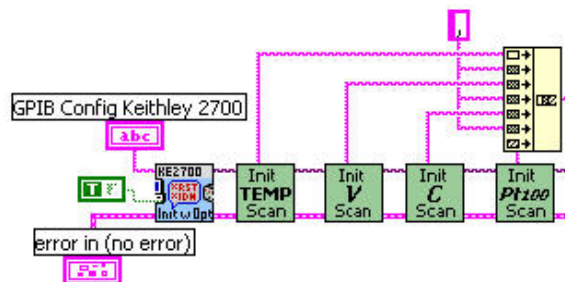


Abbildung 5-5: Hauptbildschirm "Brennstoffzelle-F3"



Zur Erfassung der Messwerte wurde ebenfalls ein subVI mit Hilfe der KEITHLEY-VIs erstellt. Dieses startet die Messwerterfassung des Datenloggers, sobald über einen Hauptbildschirm die Datenerfassung mittels „**START Datalog**“ aktiviert wurde.

In Abbildung 5-7 ist das VI mit anschließender Datenaufbereitung abgebildet. Die Messwerte der Thermoelemente und Pt100-Sensoren der Brennstoffzellen bedürfen keiner Bearbeitung, da sie schon in den benötigten Grad Celsius erfasst werden.

Die Feuchte- und Temperaturwerte der Feuchtesensoren werden als Spannungssignale mit einem Bereich von 0 bis 10 V erfasst (siehe Kap. 4.5). Bei einem Feuchtebereich von 0 bis 100%rF und einem Temperaturbereich von 0 bis 150°C erfolgt die Messwertanpassung somit durch einen Faktor 10 für die Feuchte und einen Faktor 15 für die Temperatur.

Die Stromsignale der Drucksensoren von 4 bis 20 mA müssen dem Messbereich von 0 bis 10 bar angepasst werden. Für jeden Sensor lässt sich aus dem jeweiligen Datenblatt (siehe Anhang D auf CD-R) eine Kalibrierkurve in Form einer Polynomfunktion 1. Grades ermitteln. Mit diesen werden die erfassten Stromwerte im Programm in Druckwerte umgerechnet.

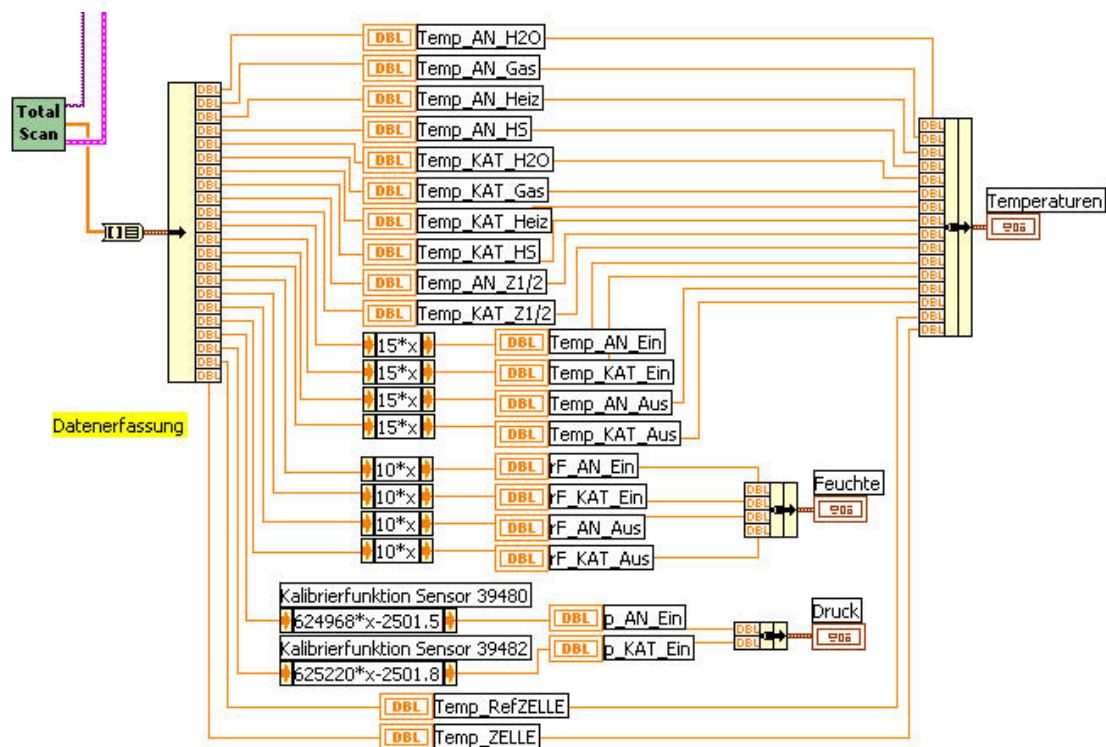


Abbildung 5-7: Blockdiagramm zur Datenerfassung und -aufbereitung

Elemente zur Datensicherung

In Abbildung 5-8 ist das Blockdiagramm zur Erzeugung der Datei dargestellt, in der die Messwerte abgespeichert werden. Dem durch den Benutzer im Hauptbildschirm „**System Config-F1**“ gewählten Dateinamen wird zusätzlich die Endung „**.dat**“ angehängt, wodurch die Datei nahezu jedem Datenverwaltungsprogramm zur Bearbeitung zugänglich ist.

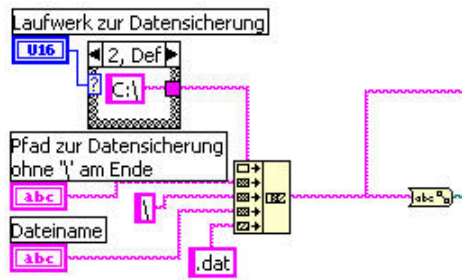


Abbildung 5-8: Blockdiagramm zur Erzeugung der Messwertdatei

Entsprechend den Messwerten, die vom Benutzer im Hauptbildschirm „**System Config-F1**“ zur Datensicherung gewählt wurden, wird nun ein Datei-Header aus den Bezeichnungen der Messwerte gebildet. Dieser wird in Form einer durch Tabulatoren getrennten Zeichenkette in der zuvor erzeugten Datei abgespeichert (vgl. Abb. 5-9). (Aufgrund der Vielzahl an Messwerten wurde auf die vollständige Darstellung des entsprechenden Blockdiagramms verzichtet und nur ein Teil stellvertretend abgebildet).

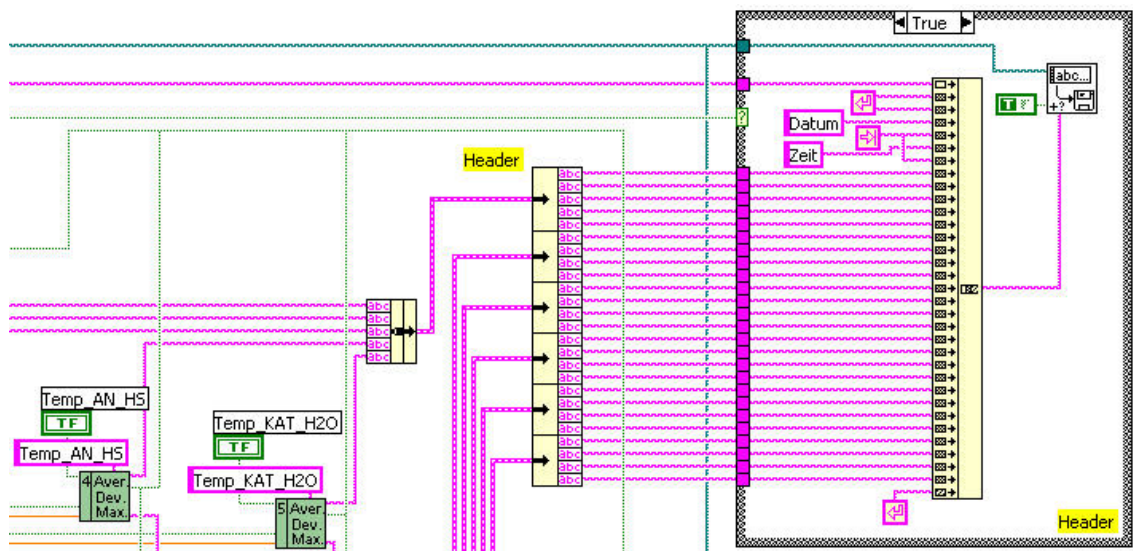


Abbildung 5-9: Blockdiagramm zur Erzeugung des Datei-Headers

Nach Erzeugen des Headers werden die erfassten Messwerte ebenfalls als eine durch Tabulatoren getrennte Zeichenkette in Form einer Zeile in der Datei abgespeichert. Dabei wird zusätzlich davor das Datum und die aktuelle Uhrzeit mit eingefügt und abgespeichert. Wie in Abbildung 5-10 zu erkennen ist, wird im Fall der angewählten Datenaufbereitung zusätzlich aus jedem Messwert Durchschnitt, Minimum, Maximum und Standardabweichung ermittelt und anschließend mit abgespeichert. (Hier wurde wiederum auf die vollständige Darstellung des entsprechenden Blockdiagramms verzichtet und nur ein Teil stellvertretend abgebildet).

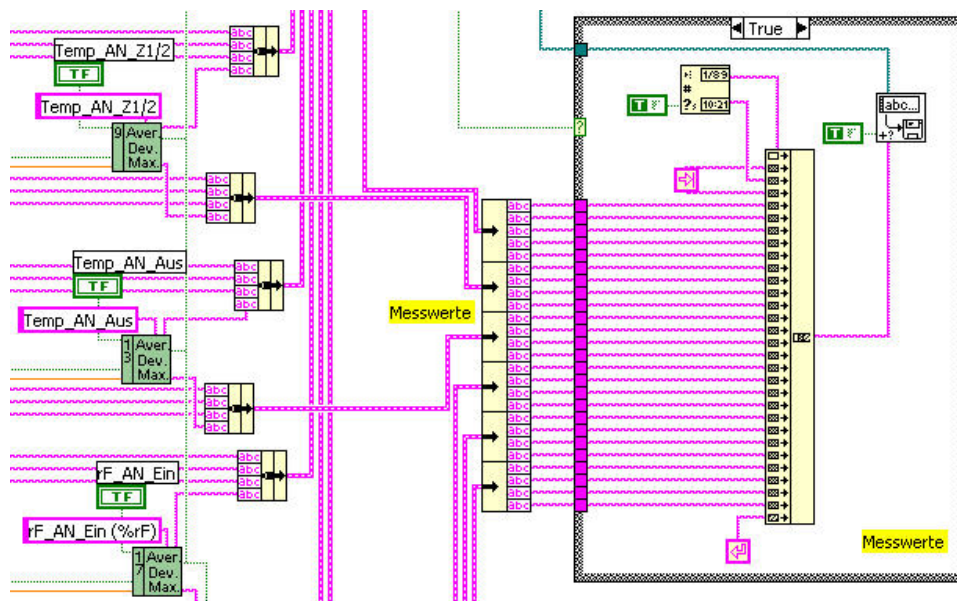


Abbildung 5-10: Blockdiagramm zur Speicherung der Messwerte

Elemente zur Temperaturregelung und Magnetventilsteuerung

Die Temperaturregelung der Befeuchter, Heizschläuche und Heizelemente der Brennstoffzellen erfolgt durch eine einfache Zweipunkt-Regelung, da durch die Trägheit der einzelnen Heizelemente ein kritisches Schwingen der Regelung verhindert wird.

Im Fall der Befeuchter wird hierzu der gemessene Wert der Gasraumtemperatur mit dem vorgegebenen Sollwert über die logische Funktion „kleiner als“ verglichen. Um ein Überschreiten der erlaubten Heizelementtemperatur zu verhindern, wird zusätzlich die Temperatur des Heizelementes mit dem maximal erlaubten Temperaturwert des Heizelementes über die logische Funktion „kleiner gleich als“ verglichen. Die Ergebnisse der beiden logischen Verknüpfungen werden mit dem OFF-Schalter, der zur softwaremäßigen Sicherheitsabschaltung der Heizelemente dient, logisch „UND“ verknüpft (vgl. Abb. 5-11).

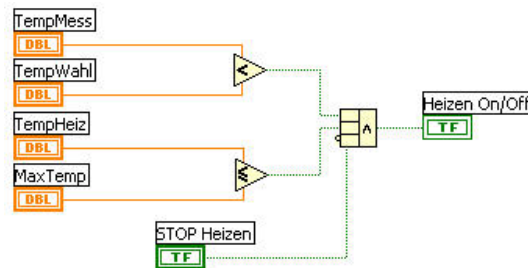


Abbildung 5-11: Blockdiagramm der Zweipunkt-Regelung

Gleichmaßen wird die Regelung der Heizschläuche realisiert, wobei sich jedoch hierbei der Sollwert auf die Temperatur des Heizelementes selbst bezieht.

Die Temperaturregelung der Brennstoffzellen erfolgt ebenso dem Prinzip der Befeuchterregelung. Hier wird jedoch die Temperatur des Heizelementes nicht direkt erfasst. Darum wird auf die gemessene Zelltemperatur ein empirisch ermittelter Offset von 40°C addiert und so als Heizelementtemperatur verwendet (vgl. Abb. 5-12). Die maximal erlaubten Temperaturen aller Heizelemente sind noch niedriger als vom Hersteller erlaubt (200°C) auf jeweils 140°C begrenzt, was eine Überhitzung theoretisch unmöglich macht.

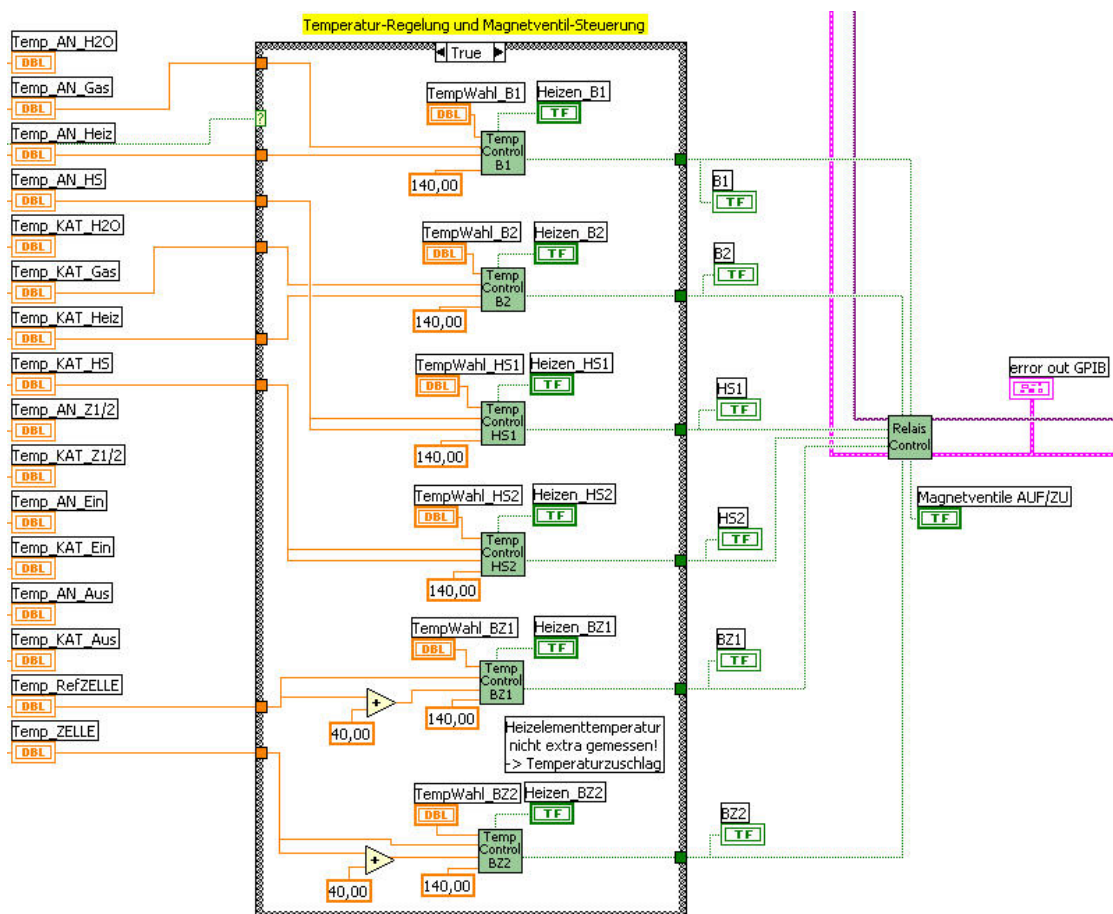


Abbildung 5-12: Blockdiagramm zur Temperaturregelung und Magnetventilsteuerung

Die aus den logischen Verknüpfungen der Temperaturregelung resultierenden Ergebnisse, sowie der Status des Schalters zur Steuerung der Magnetventile wird an das VI zur Relais-Steuerung übergeben. Dieses steuert über die entsprechenden Bitmuster die digitalen Ausgänge des Datenloggers und damit die jeweiligen Leistungsrelais an (siehe Kap. 5.2.1).

Ansteuerung der Durchflussregler

Das Softwarepaket BRONKHORST-FlowDDE, welches im Lieferumfang der BRONKHORST-Durchflussregler enthalten ist, ermöglicht die Steuerung des FLOW-BUS-Systems (siehe Kap. 4.3). Die als DDE-Server (Dynamic Data Exchange) fungierende Software ermöglicht Interaktionen mit Microsoft® Windows®-Applikationen. FlowDDE muss zu Beginn des Teststandbetriebes noch vor dem LabVIEW™-Programm gestartet werden und läuft danach im Hintergrund weiter. Das Softwarepaket beinhaltet zusätzlich Funktionen zur Programmierung in LabVIEW™, die in die VIs des Hauptprogramms zur Steuerung und Messwerterfassung der Durchflussregler integriert sind. In Abbildung 5-13 ist zur besseren Übersicht ein Teil des zugehörigen Blockdiagramms dargestellt. Hier wird zusätzlich am Beispiel der anodenseitigen Gasdosierung die Funktionsweise der Sollwertermittlung deutlich: Aus dem Wert des Gesamtdurchflusses, dem prozentualen Stickstoffanteil und der relativen Feuchte werden über einen mathematischen Formelblock die entsprechenden Werte zur Übermittlung an die Durchflussregler berechnet.

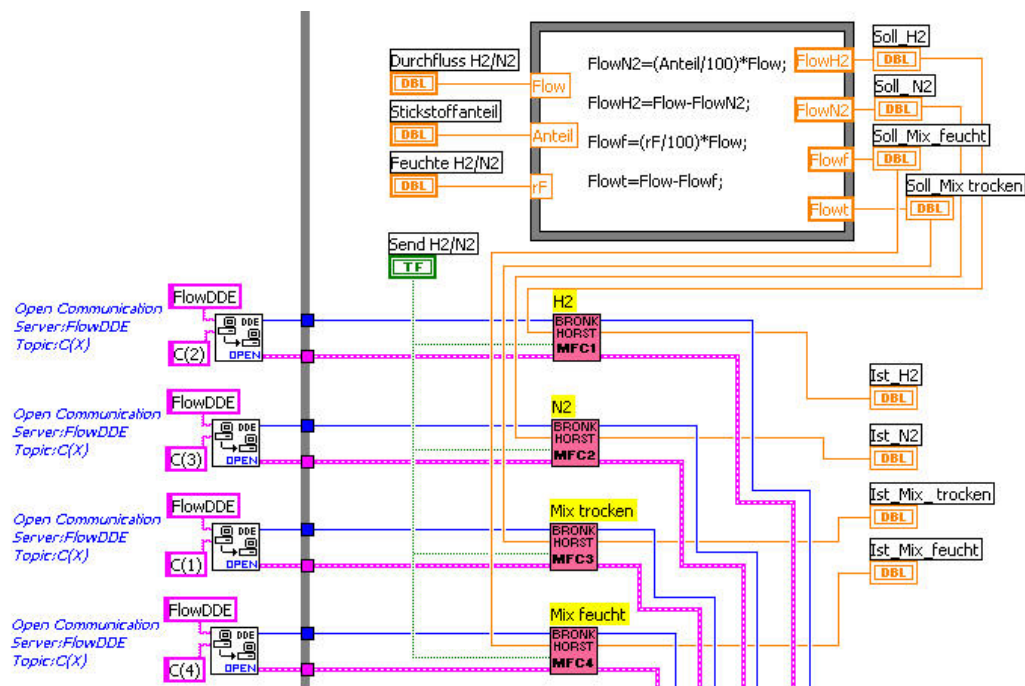


Abbildung 5-13: Blockdiagramm der Durchflussregler-Steuerung

5.3.3 Programm der elektronischen Last

Zur Erfassung der Messwerte für Spannung, Strom und Leistung der Brennstoffzelle wird ein modifiziertes LabVIEW™-Programm nach Vorlage des Lastherstellers INDUSTRIE TEAM SERVICE (ITS) GmbH eingesetzt. Ähnlich der realen Last besitzt das Programm die Möglichkeit der Moduswahl (U-, I- und G-Mode), Messbereichswahl für Strom und Spannung, sowie Sollwertvorgabe (siehe Kap. 4.8). Zudem ist es möglich, die Lastfreigabe durch Mausklick zu aktivieren. Zusätzlich zur digitalen Anzeige werden im Programm die Messwerte für Strom und Spannung über grafische Analogmesswerke ausgegeben (vgl. Abb. 5-14).

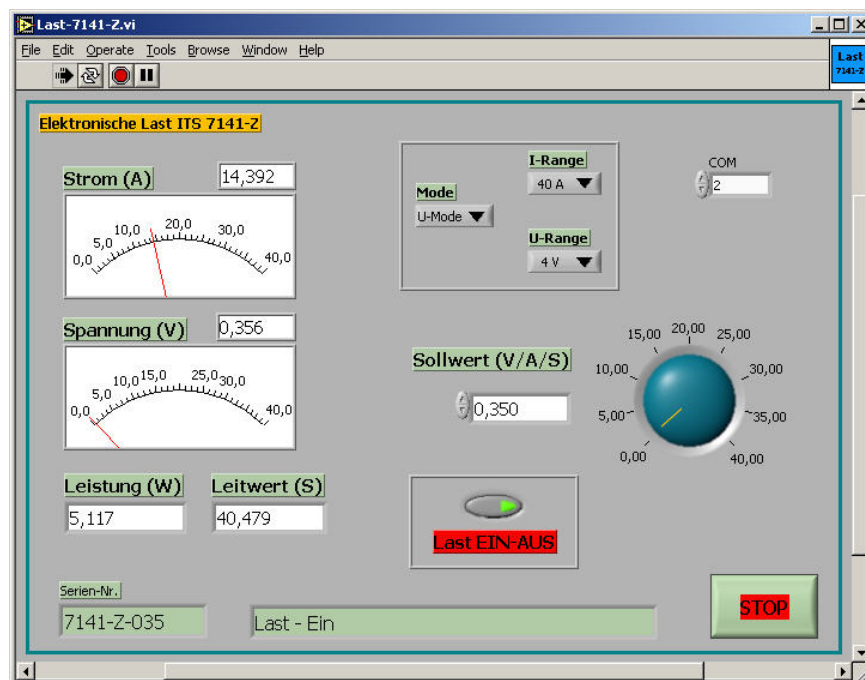


Abbildung 5-14: Frontpanel der elektronischen Last 7141-Z

Das Programm der Last wird parallel zum Hauptprogramm des Teststandes gestartet und übermittelt durch globale Variablen die erforderlichen Messwerte für Spannung, Strom und Leistung. (Das Programm ist im Anhang C auf CD-R zu finden).

6 Inbetriebnahme des Teststandes

Zur Überprüfung der korrekten Funktionsweise aller Komponenten des Teststandes erfolgte die Inbetriebnahme in mehreren Schritten. Nach Überprüfung der korrekten Stromversorgung aller Systemkomponenten und Druckdichtigkeit der gesamten Anlage erfolgte die Kontrolle der Gasdosierung. Weiterhin wurde die Gasbefeuchtung mit zugehöriger Temperierung eingehend überprüft. Um die korrekte Funktion des gesamten Teststandes zu beweisen und die zur Durchführung von Langzeittests eingesetzten Brennstoffzellen zu charakterisieren, wurden abschließend mehrere Messungen an den Test-Brennstoffzellen durchgeführt und U/I-Kennlinien aufgenommen.

6.1 Test der Gasdosierung

Da auf der Kathodenseite ausschließlich Luft bzw. Sauerstoff zugeführt wird und darum keine Mischung von Gasen nötig ist, beschränkt sich die Kontrolle der Gasdosierung auf die anodenseitige Mischung von Wasserstoff und Stickstoff. Dazu wurden auf der LabVIEW[™]-Benutzeroberfläche Gasvolumenströme mit einem Stickstoffanteil von 20%, 50% und 80% eingestellt. Um eine konstante Gaszusammensetzung zu gewährleisten, wurde jeweils die erste Menge Mischgas in den Abzug abgeblasen und anschließend eine Menge von etwa drei Litern in einer Gastüte aufgefangen. Vor jedem neuen Auffangen wurde die Gastüte zuerst mit dem Mischgas vorgespült, um eine Verunreinigung durch Umgebungsluft oder Restgase zu vermeiden. Jede entnommene Mischgasprobe wurde mit einem Gaschromatographen des Typs 6890A (G1530A) der Agilent Technologies GmbH mit einer Genauigkeit von $\pm 1\%$ analysiert. Dabei bestand jede der drei Messreihen aus drei Einzelmessungen zur genauen Überprüfung der erhaltenen Messwerte durch Bildung des gleichgewichteten Mittels. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6-1 aufgelistet. (Ein Auszug aus den detaillierten Messergebnissen ist im Anhang E auf CD-R zu finden).

Wie der Tabelle zu entnehmen ist, liegen die prozentualen Fehler der Messreihen deutlich innerhalb der Fehlergrenzen des Gaschromatographen und der Durchflussregler (vgl. Kap. 4.3). Es ist somit mit großer Genauigkeit möglich, eine definierte Gasmischung von Wasserstoff und Stickstoff einzustellen.

Stickstoffanteil Soll	Stickstoffanteil Ist	Mittelwert $\bar{x}$	Absolutabweichung in %
20%	1) 20,23% 2) 20,22% 3) 20,20%	20,21%	+1,05%
50%	1) 49,81% 2) 50,17% 3) 50,22%	50,06%	+0,12%
80%	1) 80,38% 2) 80,16% 3) 80,44%	80,32%	+0,4%

Tabelle 6-1: Ergebnisse der Gasdosierungskontrolle

6.2 Test der Gasbefeuchtung

Die Kontrolle der Gasbefeuchtung erfolgte in mehreren Schritten. Zuerst galt es zu überprüfen, ob ein Erreichen der maximalen Feuchte von 100%rF bei jedem eingestellten Volumenstrom überhaupt möglich ist. Anschließend wurde durch eine schrittweise Befeuchtung die Einstellbarkeit auf jeden beliebigen Feuchtwert untersucht. Da für alle diese Versuche ein stabiles und einheitliches Temperaturniveau im gesamten Teststand benötigt wurde, um einem möglichen Auskondensieren von Wasser durch Temperaturgefälle entgegenzuwirken, wurden die Tests bei Umgebungstemperatur und ohne jegliche Temperierung vorgenommen.

Um jedoch die gewünschten Feuchtwerte im gesamten geforderten Temperaturbereich einstellen zu können, wurden abschließend mehrere Aufheizversuche zum Erreichen eines höheren Temperaturniveaus durchgeführt.

Die genaue Durchführung der Tests und deren Ergebnisse sollen nachfolgend erläutert werden.

6.2.1 Erreichen des maximalen Feuchtwertes

Ausgehend von einer einheitlichen Temperatur aller Komponenten des Teststandes (Umgebungstemperatur) wurde durch Spülen mit trockenem Stickstoff (anodenseitig) und trockener Luft (kathodenseitig) der kleinstmögliche Feuchtwert eingestellt. Um nun festzustellen, ob die Befeuchter in der Lage sind, verschiedene Volumenströme vollständig zu befeuchten, erfolgte der Betrieb der Durchflussregler für Luft (feucht) und Wasserstoff-Stickstoff-Mix (feucht, Stickstoffanteil 20%) mit je 10%, 25%, 50%, 75% und 100% ihres maximal einstellbaren Volumenstromes (siehe Kap. 4.3). Der Abschluss der einzelnen Messungen erfolgte nach Erreichen des maximalen Feuchtwertes. Um bei allen

Messungen die gleichen Anfangsbedingungen zu schaffen, wurde der Teststand vor jeder Messung wiederum mit trockener Luft und trockenem Stickstoff gespült. In Abbildung 6-1 und 6-2 sind die Ergebnisse für die Anoden- bzw. Kathodenseite dargestellt.

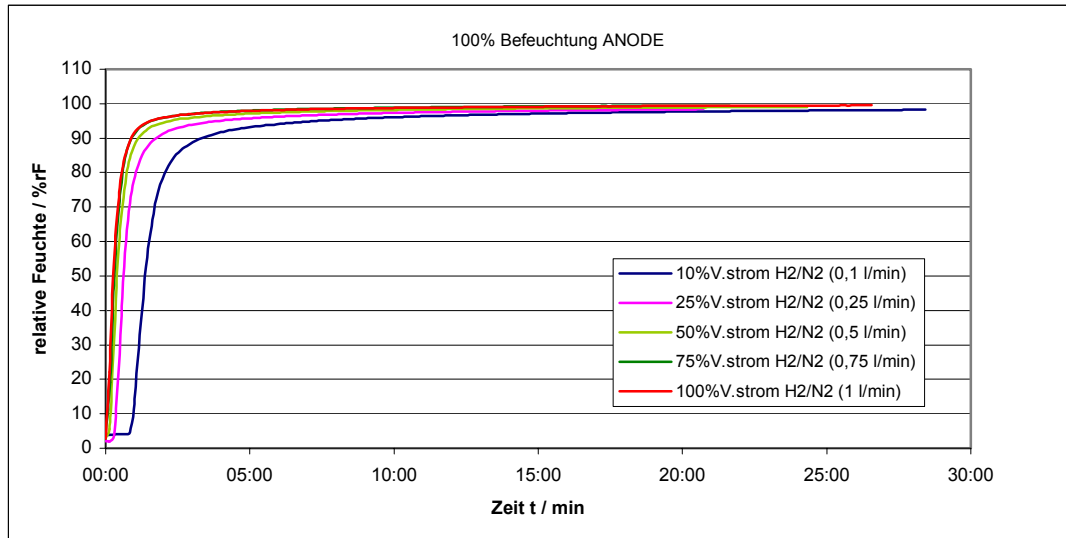


Abbildung 6-1: Anodenseitige Befeuchtung bei unterschiedlichen Volumenströmen

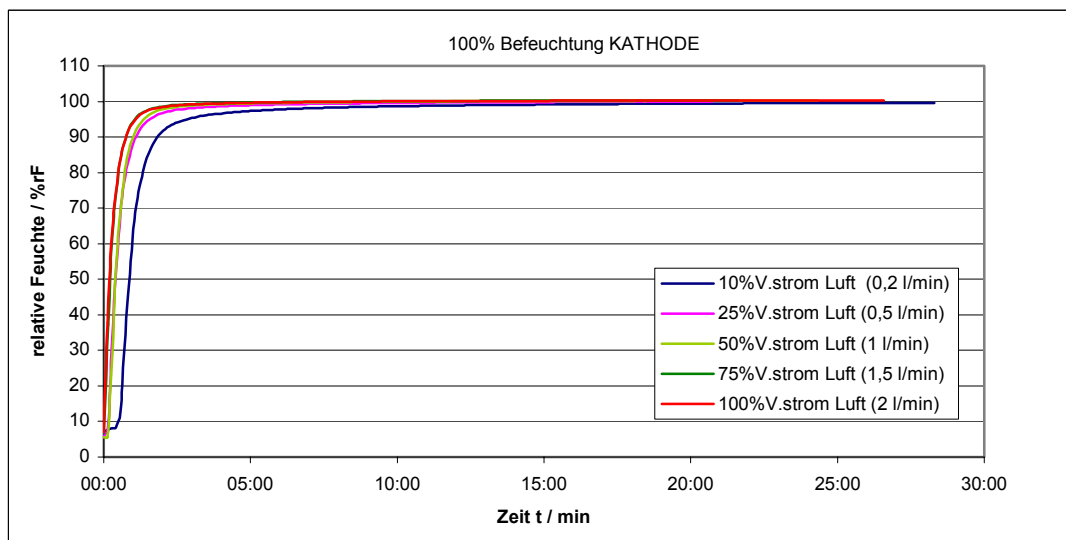


Abbildung 6-2: Kathodenseitige Befeuchtung bei unterschiedlichen Volumenströmen

Wie den Kurvenverläufen der Abbildungen zu entnehmen ist, wird kathodenseitig die gewünschte Feuchte von 100%rF im Rahmen der Messgenauigkeit bei allen eingestellten Volumenströmen erreicht. Da durch den jeweils geringeren Volumenstrom auf der Anodenseite die relative Feuchte von 100%rF langsamer erreicht wird als auf der Kathodenseite, ist bei Beenden der Messungen noch eine leichte Zunahme der Feuchte zu

beobachten. Die jeweils gemessenen Maximalwerte liegen jedoch zwischen 98,3%rF und 99,6%rF, sodass auch hier im Rahmen der Messgenauigkeit ein Erreichen der maximalen Befeuchtung von 100%rF für alle eingestellten Volumenströme der Anodenseite bestätigt werden kann.

6.2.2 Schrittweise Befeuchtung

Wiederum bei Umgebungstemperatur und ausgehend vom kleinstmöglichen Feuchtwert wurde die relative Feuchte des anoden- und kathodenseitigen Gasstromes in 20%-Schritten bis auf maximale Befeuchtung gebracht. Die Durchführung erfolgte bei maximalen Volumenströmen (Luft: 2 l_n/min; H₂/N₂: 1 l_n/min) und bei einem anodenseitigen Stickstoffanteil von 20%. Die Ergebnisse der schrittweisen Befeuchtung sind in Abbildung 6-3 dargestellt.

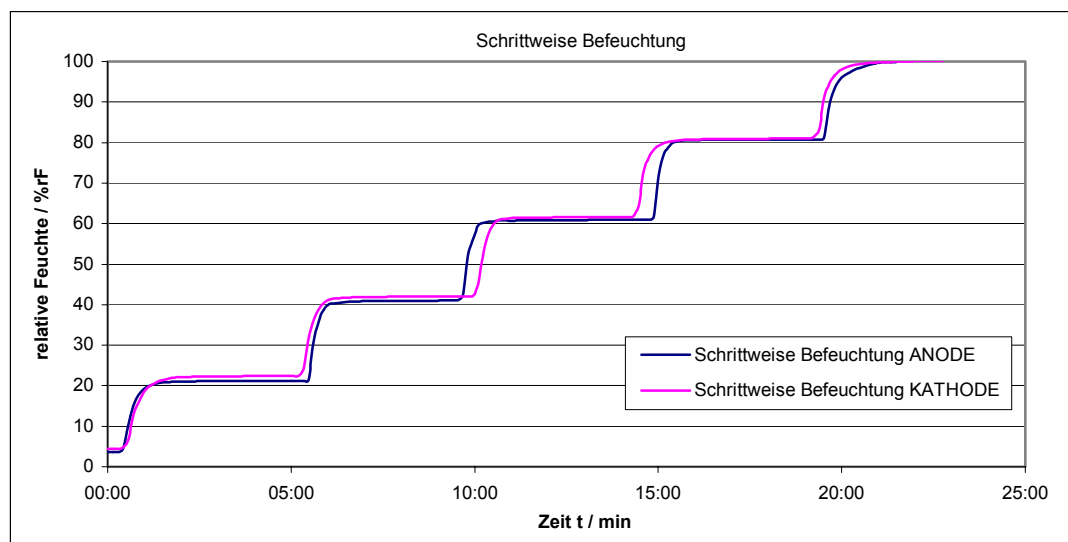


Abbildung 6-3: Schrittweise Befeuchtung anoden- und kathodenseitig

In beiden Kurvenverläufen ist bei Messbeginn zu erkennen, dass die verwendeten Gase aus der Hausversorgung schon eine gewisse Grundfeuchte besitzen. Bei der Mischung dieser nicht vollständig trockenen Gasströme mit den zugehörigen feuchten Gasströmen zum Erhalt der gewünschten Feuchte, macht sich dieser Offset (maximal 2,5%rF) bei jedem eingestellten Feuchtwert entsprechend bemerkbar. Nach Berücksichtigung der Messgenauigkeit und bei Verwendung absolut trockener Gase kann jedoch gesagt werden, dass die unterschiedlichen Feuchtwerte auf der Anoden- und Kathodenseite mit großer Genauigkeit eingestellt werden können.

6.2.3 Befeuchtung bei Temperierung

Um die gewünschte Befeuchtung der Gase auch im Bereich bis 130°C zu erreichen, muss im gesamten Teststand die gleiche Temperatur herrschen damit ein Auskondensieren von Wasser verhindert wird. Um nun zu überprüfen, ob die Wärmemenge der in den Befeuchtern beheizten Gasströme ausreicht, den Teststand auf das gewünschte Temperaturniveau zu bringen, wurde darum ausgehend von Umgebungstemperatur eine Temperatur von 80°C in den Befeuchtern eingestellt. Der Aufheizversuch wurde mit maximalen Gasvolumenströmen und bei maximaler Befeuchtung durchgeführt. Um ein Auskondensieren schon auf der Strecke zu den Feuchtemesszellen zu vermeiden, wurden die Überhitzerschläuche auf 85°C eingestellt. In Abbildung 6-4 sind die erreichten Temperaturen sowie die Temperaturverläufe der Heizelemente dargestellt.

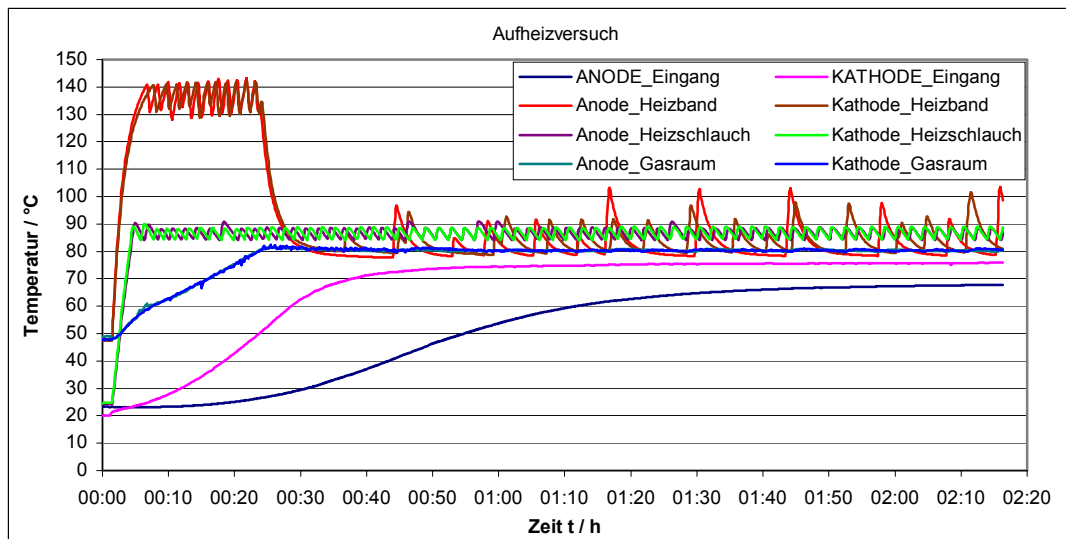


Abbildung 6-4: Temperaturverläufe des Aufheizversuches

Wie in der Abbildung zu erkennen ist, stellt sich kathodenseitig nach etwa 1,5 h eine Temperatur von 76°C ein. Auf der Anodenseite beträgt die Temperatur aufgrund des geringeren Volumenstromes nach Beenden der Messung nur etwa 68°C. Diese relativ geringen Temperaturgefälle von 4 K bzw. 12 K sind jedoch zur Einstellung einer genau definierten Befeuchtung zu hoch, da schon bei Temperaturschwankungen von einigen Kelvin geringe Mengen an Wasser im Gasweg auskondensieren und Feuchtemessungen ungenau werden lassen.

Um zu untersuchen, wo an den Feuchtemesszellen oder Gasleitungen eventuell Wärmesenken zu finden sind, die für den Temperaturunterschied verantwortlich sein

könnten, wurden vom gesamten Teststand Thermografie-Aufnahmen mit einem Thermografiesystem „VARIOSCAN high resolution“ der Firma JENOPTIK Laser GmbH gemacht (Datenblatt siehe Anhang D auf CD-R).

In Abbildung 6-5 ist eine Nahaufnahme der oberen Feuchtemesszellen (isoliert) dargestellt (weitere Aufnahmen im Anhang E auf CD-R). An den Befeuchtern links und rechts im Bild sind deutlich die Wärmeabstrahlungen durch die abgeklebten Schlitze der Isolierung zu erkennen. Ebenso wird die Abstrahlung der Heizschläuchen am Eingang zu den Messzellen deutlich. Diese Abstrahlungen sind jedoch aufgrund der Heizleistung der jeweiligen Heizelemente unerheblich.

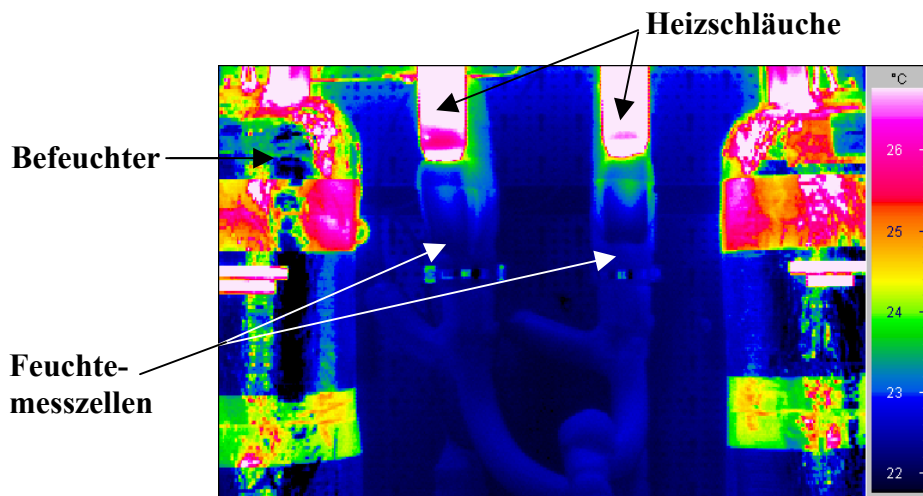


Abbildung 6-5: Thermografie-Nahaufnahme des Teststandes

In der Thermografie-Aufnahme ist im Bereich der Feuchtemesszellen selbst und entlang der Gasleitungen keine Temperaturschwankung auszumachen. Die kleineren Temperaturänderungen an den Befestigungen der Messzellen sind auf reflektierte Wärmestrahlung zurückzuführen. Somit liegt es nahe, dass durch die relativ geringen Gasvolumenströme und der damit verbundenen geringen Wärmeaufnahme derselben, schon geringste Wärmesenken durch minimale Isolationslöcher oder Ventilation einen nicht unerheblichen Wärmeverlust und damit Temperaturabfall im Gasstrom zur Folge haben. Ebenso ist die thermische Masse der Feuchtemesszellen unverhältnismäßig groß gegenüber den Gasvolumenströmen, wodurch sie eine große Wärmemenge zum Aufheizen benötigen und demzufolge den Gasströmen zusätzlich Wärme entziehen.

Um einordnen zu können, in welchen Dimensionen sich die auftretenden Wärmeverluste bewegen, wurden überschlägige Berechnungen zum Wärmehalt der maximalen Gasströme für Luft (2 l_n/min) und Wasserstoff (1 l_n/min) bei einem Aufheizvorgang von 20°C auf 80°C gemacht.

Mit der Dichte für Luft von $1,293 \text{ kg/m}^3$ und für Wasserstoff von $0,0899 \text{ kg/m}^3$ ergeben sich mit den jeweiligen maximalen Durchflussraten Massenströme von $2,586 \text{ g/min}$ für Luft und $0,0899 \text{ g/min}$ für Wasserstoff.

Luft besitzt eine spezifische Wärmekapazität von $1,005 \text{ J/(g}\cdot\text{K)}$ und Wasserstoff von $14,05 \text{ J/(g}\cdot\text{K)}$. Mit dem Temperaturunterschied von 60 K und der Gleichung für den Wärmestrom:

$$\Delta\dot{Q} = c_p \cdot \dot{m} \cdot \Delta T \quad (\text{Gl. 6.1})$$

$\Delta\dot{Q}$: Wärmestrom	$[\Delta\dot{Q}] = \text{W}$
c_p : spezifische Wärmekapazität	$[c_p] = \text{J/(g}\cdot\text{K)}$
$\dot{m}$: Massenstrom	$[\dot{m}] = \text{g/min}$
ΔT : Temperaturunterschied	$[\Delta T] = \text{K}$

ergibt sich daraus für Luft (trocken) ein Wärmestrom von etwa $2,6 \text{ W}$ und für Wasserstoff (trocken) von etwa $1,3 \text{ W}$. Im Fall einer Wärmeabgabe von $1/6$ des Wärmestromes (hier nur etwa $0,4 \text{ W}$!) ergibt sich daraus schon ein Temperaturunterschied von bis zu 10 K .

Bei Betrieb der Brennstoffzellen mit geringeren Volumenströmen ist dieser Sachverhalt entsprechend ausgeprägter, was den Wärmeverlust noch größer und auch die Aufheizzeit länger werden lässt. Aus diesem Grund wird es zusätzlich notwendig sein, die Feuchtemesszellen und evtl. die Gasleitungen über Heizbänder o.ä. von außen zu beheizen. Dadurch sind Messungen bei temperierter Befeuchtung bis dahin nur eingeschränkt möglich und aussagekräftig.

6.3 Testbetrieb mit einer Brennstoffzelle

Zur Charakterisierung der Test-Brennstoffzellen und zur Überprüfung der ganzheitlichen Funktion des Teststandes wurden als letzter Schritt der Inbetriebnahme mehrere Strom-Spannungs-Kennlinien einer Brennstoffzelle unter verschiedenen Randbedingungen aufgenommen und ausgewertet.

Die Test-Zelle (siehe Kap. 4.2) wurde in allen Versuchen mit einer Nafion[®] 117-Membran (Dicke: $175 \text{ }\mu\text{m}$) betrieben. Auf der eingesetzten Gasdiffusionsschicht von E-TEK[®] (Dicke: $280 \text{ }\mu\text{m}$) aus Kohlefasern sind sowohl die Elektroden ($80\% \text{ Vulcan} + 20\% \text{ PTFE}$) als auch der Katalysator (Beladung: $0,2 \text{ mg Pt/cm}^2$) aufgebracht. Die Abdichtung der Zelle erfolgte mit Viton[®] entsprechend dem speziell entwickelten Dichtungskonzept nach [13]. Um die Dicke der Viton[®] -Dichtungen auszugleichen und somit einen guten Anpressdruck

innerhalb der Zelle zu gewährleisten, wurde zusätzlich zur Gasdiffusionsschicht Torray®-Kohlenstoffpapier (Dicke: 260 µm) eingelegt.

6.3.1 Allgemeine Durchführung der Messungen

Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurde die Zelle in jeder Messung mit konstanten Gasvolumenströmen betrieben. Dabei wurde für Wasserstoff ein Volumenstrom von 120 ml_n/min eingestellt, was etwa einem Stöchiometriefaktor von $\lambda = 1,5$ (bei 500 mV) entspricht. Kathodenseitig wurde ein Stöchiometriefaktor von etwa 3 gewählt (siehe Kap. 3.2.2). Dies ergibt für Messungen mit reinem Sauerstoff einen Volumenstrom von 132 ml_n/min und für Luft 600 ml_n/min. Über die Backpressure-Ventile wurde ein Systemdruck von 2 bar(abs) eingestellt.

Vor Beginn der ersten Messung wurde die Zelle bei einer Spannung von 200 mV belastet, um sie so bis zum Erhalt konstanter Stromwerte „einzufahren“. Vor jeder weiteren Messung wurde bei Ruhespannung mit Hilfe eines digitalen Milliohmmeters Agilent 4338B (Datenblatt im Anhang D auf CD-R) der Ohmsche Widerstand der Zelle bestimmt, welcher sich aus einer Reihenschaltung der Materialwiderstände der Bipolarplatten, GDL und Membran zusammensetzt. Die Höhe des Ohmschen Widerstandes lässt Aussagen über den Befeuchtungsgrad der Membran und so über deren Leitfähigkeit zu.

Zur Aufnahme der einzelnen U/I-Kennlinien wurde in jeder Messung, ausgehend von der sich einstellenden Ruhespannung, die Spannung über die LabVIEW™-Benutzeroberfläche der Last in 50 mV-Schritten abgesenkt und jeweils etwa 5 Minuten beibehalten. Nach Erreichen einer minimalen Spannung, bei der sich gerade noch vernünftige Stromwerte einstellten, wurde die Messung beendet. Die gesamten Werte für Strom und Spannung wurden mit Hilfe des Datenerfassungssystems abgespeichert und anschließend ausgewertet.

6.3.2 Messungen und Ergebnisse

Charakterisierung der Zelle unter Berücksichtigung der Befeuchtung

Um den Einfluss der definierten Gasbefeuchtung auf das Betriebsverhalten der Test-Zelle zu untersuchen, wurden Kennlinien bei einer Befeuchtung von 60%rF und 100%rF aufgenommen. Die Temperatur der Befeuchter wurde dabei auf 80°C eingestellt und die Zelle selbst nicht temperiert. Es wurden jeweils Kennlinien unter Verwendung von reinem Sauerstoff und von Luft als Oxidationsgas aufgenommen. Die in Kapitel 6.2.3

beschriebenen Einschränkungen bei der Einstellung einer definierten temperierten Befeuchtung wurden dabei in Kauf genommen. In Abbildung 6-6 sind die aufgenommenen Kennlinien dargestellt.

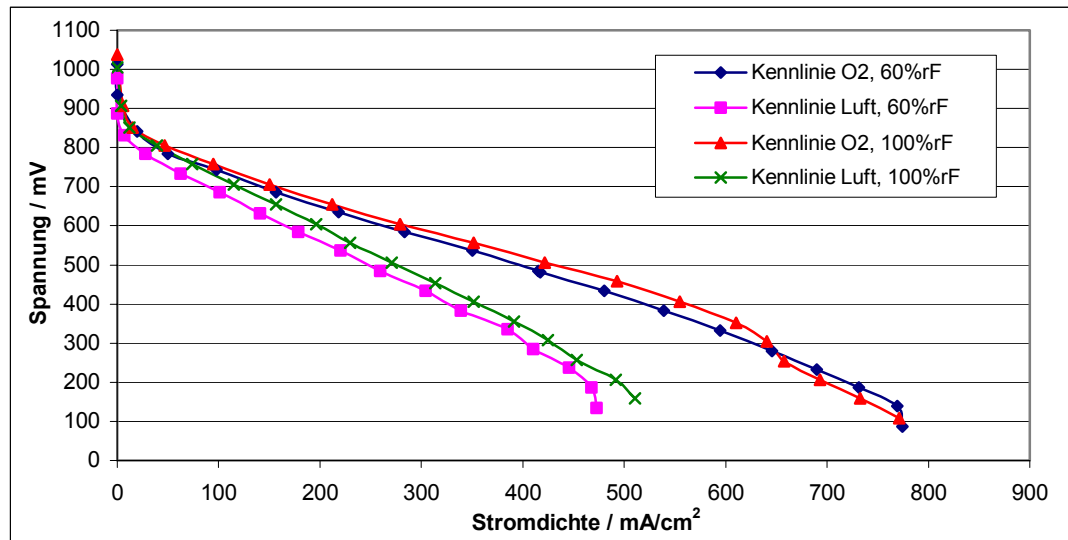


Abbildung 6-6: Kennlinien bei unterschiedlicher Befeuchtung

Allgemein verlaufen die Kennlinien mit Luft steiler als diejenigen mit Sauerstoff. Die in der Luft enthaltenen Inertgase, wie Stickstoff oder Kohlendioxid, sammeln sich im Flowfield und erschweren somit den Durchtritt der Sauerstoffmoleküle, wodurch sich der Durchtrittswiderstand in der Zelle erhöht. Zusätzlich werden dadurch kleinere Stromdichten als bei Betrieb mit Sauerstoff erzielt, was außerdem zu geringerer Wasserbildung und so zu einer geringeren Befeuchtung der Membran führt. Dies erhöht wiederum den Ohmschen Widerstand der Zelle.

Die gemessenen Ohmschen Widerstände für die Kennlinien mit Luft bewegten sich um 14 mΩ, wohingegen sich bei Sauerstoff Werte von bis zu 11 mΩ ergaben.

Weiter ist zu erkennen, dass die Kennlinien der mit 100%rF befeuchteten Zelle leicht oberhalb der mit 60%rF befeuchteten Kennlinien verlaufen. Qualitativ lässt sich damit aussagen, dass die höhere Befeuchtung leistungssteigernd wirkt. Das Einknicken der Sauerstoffkennlinie mit 100% Befeuchtung bei Werten ab etwa 650 mA/cm² ist jedoch auf eine übermäßige Bildung von Wasser in den Kanälen des Flowfields (siehe Kap. 4.2) bei hohen Stromdichten zurückzuführen. Diese teilweise Zusetzung der aktiven Zellfläche wirkt wiederum leicht leistungsmindernd.

Charakterisierung der Zelle unter Berücksichtigung der Temperierung

Bei maximaler Befeuchtung wurde der Einfluss der Temperierung auf das Betriebsverhalten der Brennstoffzelle untersucht. Hierzu wurde die Temperatur der Befeuchter wiederum auf 80°C eingestellt, die Zelle jedoch mit Hilfe der angebrachten Heizelemente auf 65°C temperiert. In Abbildung 6-7 sind die Ergebnisse dargestellt.

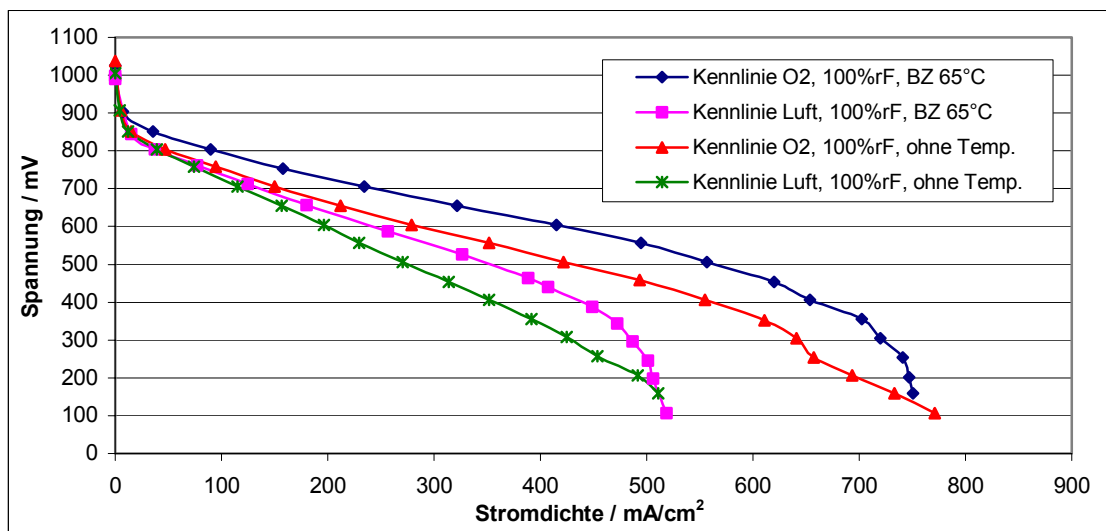


Abbildung 6-7: Kennlinien bei Temperierung der Zelle

Neben den schon bekannten Unterschieden zwischen den Verläufen der Kennlinien mit Sauerstoff und Luft, ist jeweils ein höherer Verlauf der Kennlinien bei Temperierung der Zelle auszumachen. Im Bereich geringer Stromdichten wird die Reaktionsgeschwindigkeit durch die Temperierung leicht gesteigert, was dort zu einer etwas höheren Wasserbildung und besseren Membranbefeuchtung schon zu Beginn führt. Im weiteren Verlauf der Kennlinien sind dadurch insgesamt höhere Leistungsdichten auszumachen. Bei den Messungen mit 100%rF und Temperierung wurden entsprechend geringe Ohmsche Widerstände von bis zu 9 mΩ (Kennlinie mit Sauerstoff) gemessen.

Leistungsdichte der Zelle

Der Unterschied der Leistungsdichte zwischen Luft- und Sauerstoffbetrieb soll anhand der Kennlinien mit Temperierung aufgezeigt werden, da bei den dort eingestellten Parametern die besten Messwerte erzielt wurden. In Abbildung 6-8 sind die Kennlinien mit den zugehörigen Verläufen der Leistungsdichte dargestellt.

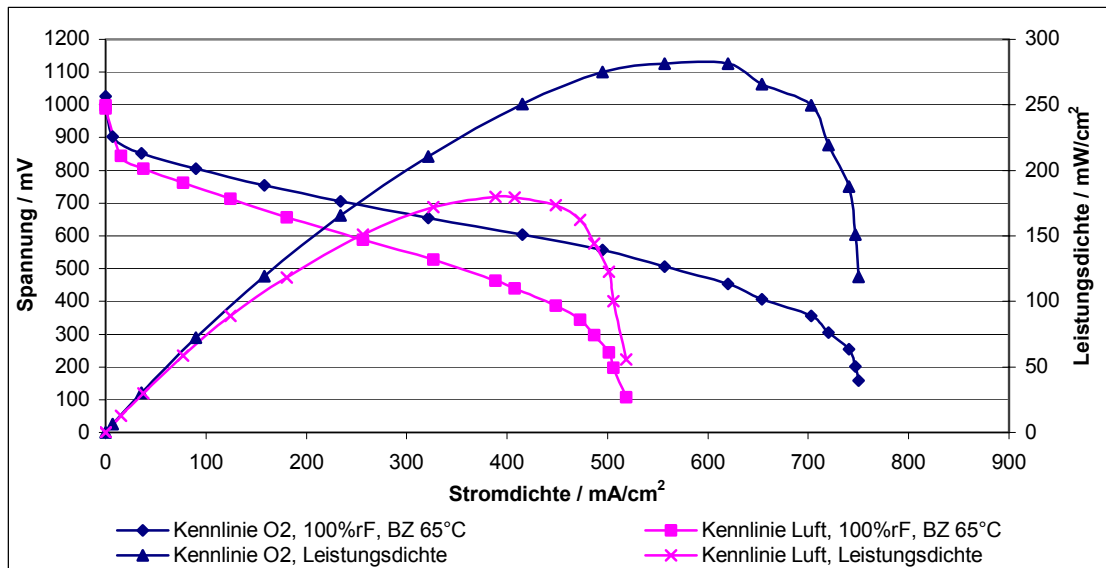


Abbildung 6-8: Verlauf der Leistungsdichten bei Luft- und Sauerstoffbetrieb

Die Leistungssteigerung bei Betrieb mit Sauerstoff als Oxidationsgas ist in der Abbildung deutlich zu erkennen. Bei einer aktiven Zellfläche von 25 cm^2 liegt hier das Leistungsmaximum für Luft bei 4,5 W und für Sauerstoff sogar bei etwa 7 W.

Mit der Aufnahme der unterschiedlichen U/I-Kennlinien und der somit vorläufigen Charakterisierung der zu testenden PEM-Brennstoffzellen wurde die Funktion des gesamten Teststandes gezeigt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Untersuchung der Degradations- und Alterungsmechanismen in Polymermembran-Brennstoffzellen (PEMFC) wurde in der vorliegenden Diplomarbeit im Rahmen eines Verbundforschungsprojektes ein automatisierter Teststand konzipiert, aufgebaut und in Betrieb genommen. Dieser Teststand dient zur Durchführung von beschleunigten Alterungstests an Einzelzellen unter standardisierten Bedingungen und zur Verifikation von theoretisch entwickelten Alterungsmodellen.

Die Gasdosierung des Teststandes, bestehend aus sechs digitalen Volumenstromreglern, erlaubt einen maximalen Gasvolumenstrom von 2 l_n/min Luft und von 1 l_n/min Wasserstoff bzw. Stickstoff. Durch die Zufuhr von Stickstoff auf der Anodenseite ist es möglich, eine definierte H₂/N₂-Mischung zur Verdünnung des Brenngases einzustellen, wodurch der Einfluss der Brenngaskonzentration auf das Leistungsverhalten und die Alterung der Brennstoffzelle untersucht werden kann.

Zur Befeuchtung der Gase wurden zwei beheizbare Befeuchtereinheiten konzipiert, mit denen jeder Gasvolumenstrom in einem Bereich von 0%rF bis 100%rF definiert befeuchtet werden kann. Beide Blasensäulen sind dabei so ausgelegt, dass eine 100%ige Befeuchtung über mehrere Tage hinweg möglich ist. Die gewünschte Feuchte wird dabei über die Gasdosierungseinrichtung durch Zumischen eines trockenen Gasstromes eingestellt, der durch einen in den Befeuchter integrierten Bypass an der Befeuchtung vorbeigeleitet wird. Zur Untersuchung des Einflusses der Temperatur auf die Alterungserscheinungen in der PEMFC sind die Befeuchtereinheiten zusätzlich bis auf 140°C beheizbar. Nachgeschaltete Heizschläuche stellen sicher, dass der Gasstrom die im Befeuchter eingestellte Temperatur behält und auf dem Weg zu den Brennstoffzellen kein Wasser auskondensiert.

Feuchte und Temperatur der Gasströme wird vor und nach Eintritt in die Zellen anoden- wie kathodenseitig überprüft. Der Systemdruck wird über zwei manuelle Druckminderer am Systemausgang eingestellt und mittels Manometer und Drucksensoren angezeigt.

Der Teststand verfügt zusätzlich über eine elektronische Last mit integrierter 0-Volt-Option zur definierten Belastung der Test-Zellen und zur problemlosen Aufnahme von U/I-Kennlinien.

Die gesamte Steuerung und Automatisierung des Teststandes wurde mittels Datenlogger, Messplatzrechner und der Automatisierungssoftware LabVIEW™ realisiert, wobei alle aktiven Komponenten über RS232- bzw. GPIB-Schnittstelle mit dem Messplatzrechner verbunden wurden. Mit Hilfe eines LabVIEW™-Programms zur Steuerung und

Datenerfassung wurde eine komfortable Bedienung aller wichtigen Systemkomponenten sowie eine übersichtliche und umfangreiche Erfassung der Messdaten ermöglicht.

Die komplette Funktionsfähigkeit des Teststandes wurde abschließend durch eine ausführliche schrittweise Inbetriebnahme aller Komponenten sowie durch Aufnahme mehrerer U/I-Kennlinien zur Charakterisierung der Test-Brennstoffzellen nachgewiesen.

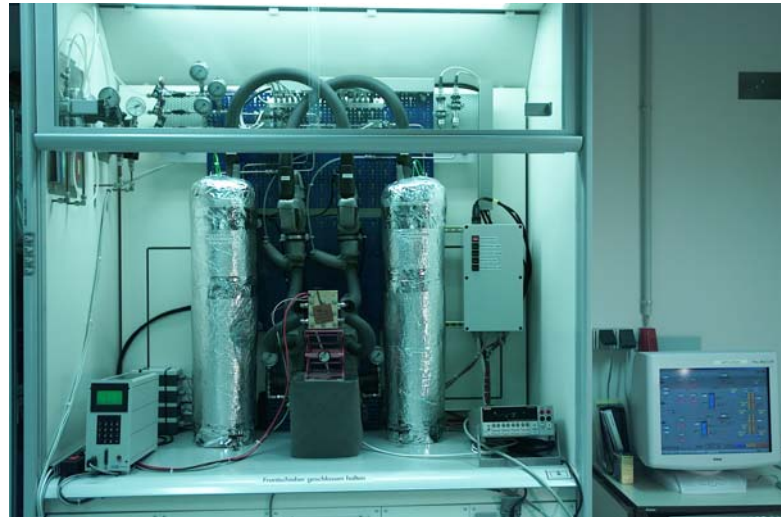


Abbildung 7-1: Gesamtansicht des Teststandes Langlebige PEFC

Während der Inbetriebnahme konnte bei temperierter Befeuchtung der Gase die Zieltemperatur durch kleinere Wärmeverluste in den Feuchtemesskammern nicht vollständig erreicht werden. Somit sind Messungen bei temperierter Befeuchtung bisher nur eingeschränkt möglich und aussagekräftig. Dies kann jedoch leicht durch Einbau einer externen Beheizung der Messzellen z.B. durch temperaturgeregelte Heizbänder behoben werden.

Im Anschluss an diese Diplomarbeit kann zur Durchführung von unbeaufsichtigten Langzeittests (über längere Zeit) an die Befeuchter über die vorgesehenen Ventile ein Dosiersystem zur Nachfüllung von deionisiertem Wasser (DI-Wasser) angeschlossen werden.

Da die Sicherheitsabschaltung bislang nur softwaremäßig realisiert wird, kann zusätzlich eine unabhängige, hardwaremäßige Abschaltung durch Thermoschalter und Gassensoren vorgesehen werden.

8 Quellen und Literaturverzeichnis

- [1] Kories, R., H. Schmidt-Walter: Taschenbuch der Elektrotechnik, Grundlagen und Elektronik, 4. überarbeitete Aufl., Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 2000
- [2] Taschenbuch der Physik, Formeln-Tabellen-Übersichten, hrsg. von Prof. Dr. H. Stöcker, 4. korrigierte. Aufl., Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 2000
- [3] Ledjeff-Hey, K., F. Mahlendorf, J. Roes, Brennstoffzellen, Entwicklung-Technologie-Anwendung, 2. neu bearbeitete und erw. Aufl., C. F. Müller Verlag, Heidelberg, 2001
- [4] Forschungsverbund Sonnenenergie, Zukunftstechnologie Brennstoffzelle, Themen 1999-2000
- [5] Fleischer, T., D. Oertel, TA-Projekt „Brennstoffzellen-Technologie“, Endbericht, hrsg. vom Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), Dezember 2000
- [6] DIN 19227 Teil 1, Graphische Symbole und Kennbuchstaben für die Prozessleittechnik (Entwurf), Berlin, 1990
- [7] Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden Württemberg, GB3, Projektantrag für das BMBF, Vernetzungsfond Erneuerbare Energien, Langlebige PEFC als Voraussetzung für eine Wasserstoffenergiewirtschaft, 2000
- [8] Kabza, Dr. A., Homepage, PEMFC – Proton Exchange Membrane Fuel Cell, URL: www.pemfc.de (Komplettes Dokument auf CD-R im Anhang F), 2001
- [9] Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik - IWE, Universität Karlsruhe, Brennstoffzellen und Batterien, Vorlesungsfolien WS 2001/02
URL: www.iwe.uni-karlsruhe.de (Komplettes Dokument auf CD-R im Anhang F)

- [10] Clark, J. A., U. S. Garganese, R. S. Swarz, An Approach to Designing Accelerated Life-Testing Experiments, The MITRE Corporation, Bedford, 1997
- [11] ReliaSoft Corporation, Accelerated Life Testing Reference, 2001
URL: www.weibull.com (Komplettes Dokument auf CD-R im Anhang F)
- [12] NIST National Institute of Standards and Technology - Information Technology Laboratory - Statistical Engineering Division, Engineering Statistics Handbook - Assessing Product Reliability, URL: www.itl.nist.gov/div898/handbook/index
(Komplettes Dokument auf CD-R im Anhang F)
- [13] Timm, D., Charakterisierung einer Brennstoffzelle unter besonderer Berücksichtigung von Alterungsprozessen, Diplomarbeit, Fraunhofer ISE, 2002
- [14] Forschungsverbund: Langlebige PEFC als Voraussetzung für eine Wasserstoffenergiewirtschaft, Zwischenbericht, Berichtszeitraum 1.1.2001 – 31.12.2001
- [15] Kraume, Dr.-Ing. M., Verfahrenstechnik II, Skript, Institut für Verfahrenstechnik, TU Berlin, WS 1996/97
- [16] Lindner, E., J. Hoinkis, Chemie für Ingenieure, 11. Auflage, Wiley-VCH, Weinheim, 1997
- [17] BRONKHORST HiTec, Digitale Massendurchflussmesser/-regler für Gase, Benutzerhandbuch, 1999
- [18] ROTRONIC, Feuchte- und Temperaturmessung, Produktkatalog 2000 / 2001
- [19] Industrie Team Service GmbH, Bedienungsanleitung - Elektronische Last 7141-Z
- [20] Larminie, J., A. Dicks, Fuel Cell Systems Explained, Wiley-VCH, Weinheim, 2000

9 Anhang – CD-ROM

Auf der beiliegenden CD-R ist der komplette Anhang entsprechend der unten aufgeführten Gliederung abgespeichert. Die CD-R enthält zusätzlich eine Readme-Datei in pdf-Format, die weitere Informationen zum Inhalt des Anhangs enthält.

Falls benötigt ist eine Version des Adobe[®] Acrobat[®] Reader[®] beigelegt, um die verschiedenen Dokumente einsehen zu können.

Anhang A – Stromlaufplan + Kanalbelegung Datenlogger

- Kanalbelegung KEITHLEY Datenlogger
- Stromlaufplan des Teststandes
- Verfahrensfließbild des Teststandes

Anhang B – Berechnungen Befeuchter

- Absolute Feuchte von Gasen
- Dimensionierung der Befeuchtereinheiten

Anhang C - Software

- LabVIEW[™]-Beispiele für die BRONKHORST Durchflussregler
- LabVIEW[™]-Treiber für den KEITHLEY Datenlogger
- LabVIEW[™]-Programmierung – Hauptprogramm und Programm der Last

Anhang D – Datenblätter + Technische Zeichnungen

- Datenblätter, technische Zeichnungen und Informationsmaterial aller Systemkomponenten und verwendeten Messgeräte

Anhang E - Inbetriebnahme

- Diagramme und Kennlinien
- Ergebnisse der Gaschromatographie
- Thermografie-Aufnahmen

Anhang F - Quellen

- Downloads der verwendeten WWW-Quellen

Anhang G - Diplomarbeit

- Schriftliche Ausarbeitung

